

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Телекомунікаційних систем

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Л.О. Уривський

«__» _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

**на тему: «Дослідження показників мультисервісного обслуговування в
безпроводових мережах зв'язку на основі стандартів 802.11»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ТС-61м

Осипчук Іван Степанович _____

Керівник:

к.т.н., ст. викладач

Осипчук Сергій Олександрович _____

Рецензент:

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ініціали _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Телекомунікаційних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (172.3620.1
«Телекомунікаційні системи та мережі»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Л.О. Уривський

«___» _____ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Осипчуку Івану Степановичу**

1. Тема дисертації «Дослідження показників мультисервісного обслуговування в безпроводових мережах зв'язку на основі стандартів 802.11», науковий керівник дисертації - Осипчук Сергій Олександрович, к.т.н., ст. викладач, затверджені наказом по університету від «06» квітня 2018 р. № 1105-с.

2. Строк подання студентом дисертації 15 травня 2018 року.

3. Об'єкт дослідження - безпроводові мережі зв'язку стандарту 802.11.

4. Предмет дослідження - показники мультисервісного обслуговування. Вихідні дані: технології стандартів IEEE 802.11n/ac, сигнально-кодові конструкції (СКК), механізми надання QoS в безпроводових мережах стандарту 802.11.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- розглянути основні механізми дослідження показників мультисервісного обслуговування в безпроводових мережах зв'язку;
- дослідити основні тенденції розвитку телекомунікаційних безпроводових мереж;
- дослідити механізми забезпечення QoS в широкосмугових мережах доступу;
- створити модель оцінки канального ресурсу мультисервісної мережі;

- дослідити інструментарій для реалізації імітаційного моделювання розподілу каналного ресурсу в мультисервісній мережі;
- експериментально дослідити лабораторну мультисервісну мережу.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Плакат №1 «Тема, мета, об'єкт та предмет дослідження магістерської дисертації»

Плакат №2 «Перелік поставлених задач»

Плакат №3 «Особливості стандарту 802.11»

Плакат №4 «Розподіл каналного ресурсу при обслуговуванні мультисервісного трафіку»

Плакат №5 «QoS в мультисервісних мережах»

Плакат №6 «Висновки по виконаній роботі»

7. Орієнтовний перелік публікацій

1. Осипчук І. С., Осипчук С.О. Perspectives of using Wi-Fi 802.11 technology with considering the others data transfer standarts. // Одинадцята міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій», ІТС НТУУ "КПІ імені І. Сікорського", м Київ, 2017.

2. Осипчук І. С., Осипчук С.О., Чекунов М.В., Кирашук В.В. Theoretical research and practical design of IoT testbed solution based on ESP8266 SOC and blank components. // Дванадцята міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій», ІТС НТУУ "КПІ імені І. Сікорського", м Київ, 2018.

8. Дата видачі завдання 10 вересня 2016 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Актуальність дослідження показників мультисервісного обслуговування в безпроводових мережах на основі стандартів 802.11. Написання 1 розділу роботи.	31.12.2016	Виконано
2	Мультисервісне обслуговування на основі засобів зв'язку стандарту IEEE 802.11. Написання 2 розділу роботи.	15.02.2017	Виконано
3	Дослідження каналного ресурсу мультисервісних мереж. Написання 3 розділу роботи.	15.10.2017	Виконано
4	Дослідження показників мультисервісного обслуговування в мережі на основі стандарту 802.11 на основі обладнання MikroTik	15.02.2018	Виконано
5	Належне оформлення роботи, написання висновків, розробка плакатів.	05.05.2018	Виконано

Студент

Осипчук І.С.

Науковий керівник дисертації

Осипчук С.О.

РЕФЕРАТ

Обсяг магістерської дисертації складає 107 сторінок, зокрема 17 ілюстрації, 11 таблиць, 18 формул та 35 джерел інформації.

Метою роботи є дослідження показників мультисервісного обслуговування в безпроводових мережах зв'язу на основі стандарту 802.11n.

В даній роботі розглядаються сучасні методи організації мультисервісних мереж в безпроводових мережах зв'язку, конкретніше в цьому напрямі досліджується стандарт 802.11n - як один з найпоширеніших та передових стандартів. В роботі детально вивчаються особливості організації мультисервісного обслуговування в стандарті 802.11n. Досліджена концепція мультисервісних телекомунікаційних мереж та характеристики мультисервісного трафіку. Розглянута організація управління і моніторингу мультисервісних мереж. Були проведені лабораторні практичні дослідження експериментальної безпроводової мережі на предмет організації мультисервісної мережі в мережі на основі обладнання IEEE 802.11n та відповідного дослідження параметрів цієї системи.

БЕЗПРОВОДОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ, МУЛЬТИСЕРВІСНА МЕРЕЖА, СТАНДАРТ IEEE 802.11, WI-FI, ДОСЛІДЖЕННЯ, МОДЕЛЬ OSI, КАНАЛЬНИЙ РЕСУРС, QOS, МІКРОТІК, МУЛЬТИМЕДІЙНИЙ ТРАФІК.

ABSTRACT

The work contains 107 pages, 17 illustrations, 11 tables, 18 formulas and 35 sources.

The aim is to study parameters of the multiservice wireless service networks based on standard 802.11n.

In this paper the modern methods of multiservice networks in wireless communication networks were described, particularly in this area investigate standard 802.11n - as one of the most popular and advanced standards. The paper details the features of multiservice service standard 802.11n. Explored the concept of multiservice telecommunications networks and multiservice traffic characteristics. Organization management and monitoring of multi-service networks were considered. Also experimental research laboratory practical wireless network in terms of multi-network network based on standards IEEE 802.11n were conducted.

WIRELESS COMMUNICATION NETWORKS, MULTISERVICE NETWORK,
IEEE 802.11 STANDARD, WI-FI, RESEARCH, OSI MODEL, CHANNEL
RESOURCE, QOS, MIKROTIK, MULTIMEDIA DATA

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗВИТКУ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ ЗВ’ЯЗКУ НА ОСНОВІ СТАНДАРТІВ IEEE 802.11	14
1.1. Тенденції розвитку телекомунікаційних безпроводових мереж.....	14
1.2. Аналіз сучасних бездротових мультисервісних мереж	17
1.3. Перспективи використання технології Wi-Fi 802.11n з урахуванням інших стандартів передачі даних	23
1.4 Місце стандарту IEEE 802.11 в моделі OSI. Характеристики стандарту 802.11n на фізичному та каналному рівнях	23
Висновки до розділу 1	328
РОЗДІЛ 2. МУЛЬТИСЕРВІСНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ НА ОСНОВІ ЗАСОБІВ ЗВ’ЯЗКУ СТАНДАРТУ IEEE 802.11	33
2.1 Моделювання мультисервісної мережі з узагальненою схемою резервування каналного ресурсу	33
2.2 Якість сервісу в мультисервісних мережах.....	44
2.3 Способи оцінки показників мультисервісного обслуговування в мультисервісних мережах	51
Висновки до розділу 2	53
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ КАНАЛЬНОГО РЕСУРСУ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ МЕРЕЖ.....	55
3.1 Розподіл каналного ресурсу при обслуговуванні мультисервісного трафіку .	58
3.2 Особливості формування сигнально-кодових конструкцій на основі технології IEEE 802.11	66

3.3 Дослідження технічної ефективності радіоканалів телекомунікаційних мереж на основі технології Wi-Fi	70
3.4 Особливості стандартів безпроводового зв'язку IEEE 802.11n/ac.....	77
Висновки до розділу 3	84
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ МУЛЬТИСЕРВІСНОГО	
ОБСЛУГОВУВАННЯ В БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ	
ОБЛАДНАННЯ МІКРОТІК	86
4.1 Вибір безпроводового обладнання зв'язку для проведення досліджень та його характеристики	86
4.2 Реалізація розробленої експериментальної мультисервісної мережі	94
Висновки до розділу 4	101
ВИСНОВОК.....	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	105

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

3GPP	Third Generation Partnership Project - міжнародний проект партнерства третього покоління
ACK	ACKnowledgement – квитанція підтвердження
AP	Access Point – точка доступу
BSS	Basic Service Set - базова зона обслуговування
CDMA	Code Division Multiple Access- множинний доступ з кодовим розділенням каналів
CSMA/CA	Carrier sense multiply access with collision avoidance - методом колективного доступу з контролем несучої і запобігання колізіям
CSMA/CD	Carrier sense multiply access with collision detection - методом колективного доступу з контролем несучої і виявленням колізій
CTS	Clear to send
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing – грубе спектральне ущільнення
DCF	Distributed Coordination Function - функція розподіленої координації
DS	Distribution System - розподільча система
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution – модернізація GPRS
ETSI	European Telecommunications Standards Institute - Європейським Інститутом Стандартів Телекомунікацій
FDD	Frequency division duplex – дуплексування з розділенням по частоті
FDMA	Frequency Division Multiple Access - множинний доступ з частотним розділенням каналів
GI	Guard Interval – захисний інтервал
GPRS	General Packed Radio System - технологія бездротової передачі пакетних даних

GSM	Global System for Mobile Communications - міжнародний стандарт для мобільного цифрового стільникового зв'язку
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access - доступ високошвидкісного приймання пакетних даних
HSPA	High Speed Packet Access - Протокол високошвидкісного пакетного доступу
HT	High Throughput - висока пропускна здатність
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers - міжнародна організація інженерів у галузі електротехніки, радіоелектроніки та радіоелектронної промисловості
LTE	Long-Term Evolution – довгостроковий розвиток
MAC	Media Access Control – управління доступом до середовища
MAN	Metropolitan Area Network – міська мережа
MCS	Modulation and Coding Scheme – схема модуляції і кодування
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output – технологія багатоканальний вхід / вихід
MME	MultiMedia Extensions – мультимедійні розширення
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексування з ортогональним розділенням каналів
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access - Множинний доступ з ортогональним частотним розділенням
OSI	Open Systems Interconnection Basic Reference Model - базова еталонна модель взаємодії відкритих систем
PCF	Point Coordination function - функція централізованої координації
PHY	Physical layer – фізичний рівень моделі OSI

QAM	Quadrature Amplitude Modulation – квадратурна амплітудна модуляція
RTS	Ready to send – стан готовності до відправки
TDD	Time division duplex – дуплексування з розділенням у часі
TDM	Time Division Multiplexing – мультиплексування з поділом за часом
TDMA	Time Division Multiple Access - множинний доступ з часовим розділенням каналів
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System - універсальна система мобільного зв'язку
VPN	Virtual Private Network — віртуальна частина мережі
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access - Широкосмуговий Багатостанційний Доступ з Кодовим Розділенням
WPA	Wi-Fi Protected Access - один з протоколів безпеки для захисту бездротових мереж

ВСТУП

Розвиток людства завжди супроводжується стрімким збільшенням інформації. Ця тенденція стає все більш актуальною в наш час. Відповідно розвиваються інформаційно-телекомунікаційні системи, у різних проявах. При цьому зростають їхні розміри, структури, пропускна здатність.

На зараз неможливо уявити повноцінне функціонування суспільства без використання безпроводових мереж та технологій, вони стали незамінною частиною повсякденного життя. Із розвитком безпроводових технологій також знижується вартість їх використання завдяки конкуренції між виробниками обладнання і постачальниками послуг. Відповідно, разом із усім зростають і вимоги які висуваються до технологій, тому безпроводові телекомунікаційні системи це одне із найбільш пріоритетних питань. Активно розвиваються мультисервісні мережі, які надають багато сервісів користувачу одночасно (здійснюють передачу голосу, відеозображення і даних) [1].

На сьогоднішній день потреба в спілкуванні, в передачі та зберіганні інформації виникає все в більше і більше, це пов'язано з розвитком людського суспільства. Нові умови життя дають нам зрозуміти, що інформаційна сфера діяльності людини є визначальним фактором інтелектуальної, економічної та оборонної можливостей держави і людського суспільства в цілому.

Безпроводові мережі зв'язку займають важливе місце в світі телекомунікацій, саме тому питання щодо їх розвитку є дуже актуальним.

Мета роботи: полягає у дослідженні показників мультисервісного обслуговування в безпроводових мережах в стандартах 802.11.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні завдання:

- розглянути основні механізми дослідження показників мультисервісного обслуговування в безпроводових мережах зв'язку;
- дослідити основні тенденції розвитку телекомунікаційних безпроводових мереж;
- дослідити механізми забезпечення QoS в широкосмугових мережах доступу;

- створити модель оцінки каналного ресурсу мультисервісної мережі;
- дослідити інструментарій для реалізації імітаційного моделювання розподілу каналного ресурсу в мультисервісній мережі;
- експериментально дослідити лабораторну мультисервісну мережу.

Об'єктом дослідження є безпроводові мережі зв'язку, побудовані на основі стандарту 802.11n.

Предметом дослідження виступають показники мультисервісного обслуговування.

РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗВИТКУ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ СТАНДАРТІВ IEEE 802.11

1.1. Тенденції розвитку телекомунікаційних безпроводових мереж

Актуальність даної теми полягає в тому, що для розвитку суспільства, необхідним є впровадження інноваційних систем. Це пов'язано з тим, що людство переходить на новий рівень спілкування і передачі інформації. Тепер для того, щоб передати повідомлення немає необхідності знаходитися на близькій відстані. Є можливість передавати інформацію з різних точок планети. Тому комунікаційні системи дуже сильно впливають на всі сфери життя людини. Розвиток зв'язку на початку XXI століття загалом характеризується наступними поняттями: універсалізація, інтеграція, інтелектуалізація - в частині технічних засобів і в мережевому плані; глобалізація, персоналізація - в частині послуг. Прогрес в області зв'язку заснований на розробці та освоєнні нових телекомунікаційних технологій, а також на подальшому розвитку і вдосконаленню ще не вичерпавших свій потенціал існуючих технологій.

Стрімкий розвиток телекомунікацій, заснований на досягненнях мікроелектроніки, дозволив різко підвищити ефективність транспортування, розподілу, обробки, зберігання інформації, а також і пропускну здатність систем і середовищ передачі. Основна риса сучасних телекомунікацій полягає в передачі і обробці сигналів в цифровому вигляді. Цифровізація дозволила побудувати економічно ефективні цифрові системи зв'язку з широким, в порівнянні з аналоговим, спектром послуг[2].

Поглиблення інформатизації суспільства зумовлює необхідність створення ефективної системи поширення інформації, і постійного її вдосконалення. Випереджальний розвиток телекомунікацій є необхідною умовою для створення інфраструктури бізнесу, формування сприятливого інвестиційного клімату, розвитку сучасних інформаційних технологій.

Вибір способу комутації в телекомунікаційних мережах обумовлений вимогами до якості зв'язку. Так при передачі мови потрібна мінімальна тимчасова затримка сигналів, а окремі помилки в сигналах - не так критичні. А передача даних, навпаки, високо чутлива до помилок і набагато менше - до затримок в процесі передачі. Тому в телефонних мережах загального користування використовується комутація каналів без складних механізмів захисту від помилок. А в мережах передачі даних використовують комутацію пакетів, а також складні, але ефективні механізми захисту від помилок.

Суперечливі вимоги до передачі мови і даних є однією з причин існування різних мереж, таких як телефонні мережі, мережі передачі даних і інші.

Високі темпи розвитку телекомунікаційного ринку у всьому світі зумовлені дією декількох факторів, до основних з котрих відносяться технологічні та соціально-економічні. Попит, що постійно збільшується, на послуги голосового зв'язку і високошвидкісної передачі даних стимулюють телекомунікаційних операторів увінчувати потужність мереж за рахунок їх модернізації і переходу на нові, більш прогресивні технології. Прогрес технологій веде до появи на світовому телекомунікаційному ринку все більшого асортименту послуг зв'язку. Одночасно з цим спостерігається зростання вимог споживачів до якості цих послуг.

В останні десятиліття відбувається міграція телекомунікаційних технологій в двох основних напрямках:

- від голосових послуг до передачі великих потоків даних по швидкісним каналам;
- від нерухомого користувача до мобільного, що може забезпечити тільки бездротовий зв'язок.

Область, яка включає в себе ці два напрямки розвитку телекомунікаційних технологій, називається мультисервісною мережею, вона нерозривно пов'язана з мережами широкосмугового бездротового доступу.

Під терміном широкосмугового доступу зазвичай розуміється організація швидкісного каналу від декількох Мбіт/с від абонента до якого-небудь публічному ресурсу, наприклад Інтернет, телефонної мережі загального користування і т.д.

Також дуже важливо, що широкосмуговий доступ забезпечує абоненту інтеграцію всіляких послуг (Інтернет, спеціалізовані дані, відео, голос тощо).

До недавнього часу існуючі широкосмугові системи володіли суттєвими недоліками. Так, вони працювали тільки в умовах прямої видимості від абонента до базової станції, що сильно звужує область використання. Одні системи володіли недостатніми характеристиками для якісного обслуговування великої кількості абонентів, а інші системи не могли якісно надавати великому числу абонентів послугу передачі даних з високою швидкістю. Але найважливіше це те, що практично всі системи володіли недостатньою частотною ефективністю, тобто вони не могли надавати для кожного абонента високі швидкості в умовах обмеженого частотного ресурсу [3].

У зв'язку з названими проблемами виникла необхідність створення нового класу систем - систем широкосмугового бездротового доступу з інтеграцією послуг.

Необхідно було створити дешеві термінальні пристрої масового використання, які не вимагали б прямої видимості до базової станції.

Початок розвитку широкосмугових технологій довелося на середину 90-х років. Зараз в світі налічується більше 100 млн. широкосмугових користувачів, доступ для яких організовано за допомогою різних технічних засобів: DSL, ADSL, кабелю, супутникового каналу, наземного радіоканалу тощо. Практично всі аналітики оцінюють щорічний приріст числа користувачів на 30-40%, що означає, що при збереженні цих темпів через 7-8 років можна очікувати значне збільшення числа користувачів мультисервісних мереж, при цьому основний приріст очікується за рахунок клієнтів південно-східній Азії.

За темпами зростання широкосмуговий доступ можна порівняти з ростом в свій час Інтернету в цілому, тільки з затримкою приблизно на десятиліття. Не виключено, що лідерами в широкосмуговому доступі виявляться країни з менш розвиненою структурою Інтернет, період розвитку яких припадає на найбільше зростання саме цієї технології.

Для оцінки якості широкосмугового доступу зазвичай використовуються якісні і кількісні показники, до яких відносяться: швидкість передачі, надійність каналу,

якісний набір послуг. Швидкості доступу в перерахунку на одного абонента за останні кілька років виросли від 64 до 2048 кбіт/с і вище. Якісний набір послуг з часом доповнюється телефонією, відео і широким спектром інформаційних та бізнес-додатків. Ціни ж постійно знижуються.

Бездротовий широкосмуговий доступ має кращу перспективу. Його частка в широкосмуговому доступі має зрости з 7-8% в даний час до 15% через п'ять років по песимістичним прогнозам і 25% за оптимістичними.

Розвиток безпроводних мереж передачі інформації в Україні й в усьому світі, про що багато говорять як про бездротову революцію в області передачі інформації, пов'язаний з такими перевагами, як:

- можливість динамічної зміни топології мережі при підключенні, пересуванні і відключенні мобільних користувачів без значних втрат часу, тобто гнучкість архітектури;
- висока швидкість передачі інформації (1-1000 Мб/с і вище);
- швидкість проектування і розгортання;
- високий ступінь захисту від несанкціонованого доступу;
- відмова від дорогої, і не завжди можливої, прокладки або оренди оптоволоконного чи мідного кабелю [4].

1.2. Аналіз сучасних бездротових мультисервісних мереж

Бездротові мультисервісні мережі, будучи досить відомою технологією ще 10 років тому, зараз стають мейнстримом розвитку. І на конференціях, присвячених телемовленню, все частіше звучить думка, що вже скоро нові бездротові технології «обріжуть кабель».

Так, кажуть прихильники цієї точки зору, це відбудеться не завтра, але в найближчі роки п'ять - точно. Все більше розгорається боротьба за так званий цифровий дивіденд між телемовленням і стільниковими операторами. І якщо у перших основний козир - це велике охоплення і набагато більш ефективно

використання спектра при масовому мовленні, то другі наголошують на наявності інтерактивних або, як зараз кажуть, нелінійних послуг.

Якщо визнати, що мережі треба якось класифікувати, то бездротові мережі розрізняють по відстані доступу та охопленням території, що обслуговується: від індивідуальної мережі (PAN, Personal area network) і локальної (LAN, Local area network) до глобальної мережі (GAN, Global area network). Між ними знаходяться мережі міські (MAN, Metropolitan area network), кампусні (Campus area network) і регіональні (WAN, Wide area network). Очевидно, що в певних випадках межі між цими класифікаціями сильно розмиті.

Персональна мережа охоплює зв'язок між особистими пристроями користування, як правило, це зв'язок гаджета зі стаціонарним комп'ютером через Bluetooth або по інфрачервоному каналу. LAN - це домашня або офісна мережа. Кампусна - те ж саме, але побільше; як правило, вона включає в себе кілька локальних мереж. Міська - те ж саме, але в межах міста або міської агломерації. Регіональна мережа пов'язує кілька міських, глобальна - охоплює

весь світ. Розподіл досить умовний, але загальне уявлення по застосованих технологіях і послугах, що надаються, він дати може [5].

За топологією мультисервісні мережі діляться на «точка-многоточка» і «точка-точка». За змістом - на корпоративні і операторські. Перші створюються в інтересах бізнес-клієнтів, другі - для надання послуг і отримання абонентської плати за них.

Системи широкосмугового бездротового доступу пройшли досить довгий шлях, щоб з розсипу різних технологій перетворитися в єдину мережу, об'єднану єдиними стандартами і однією загальною технологією. Цей процес ще далекий від завершення, але основний напрямок розвитку вже сумнівів не викликає.

Ті бездротові стандарти і технології, які в цій боротьбі все-таки вижили, вирішують локальні нішеві завдання. Зараз, якщо говорити про хоч скільки-небудь масове застосування, всі існуючі мережі і працюючі стандарти прагнуть до мультисервісності: DVB намагаються якось доопрацювати, щоб налагодити нелінійне мовлення, в стільникові стандарти спішно впроваджують доопрацювання для масового мультикасту. Зрозуміло (особливо в корпоративному секторі),

залишаються і окремі мережі передачі даних, в тому числі мережі для надання послуг одночасної передачі даних і голосу (VoIP), надання в оренду каналів високошвидкісного інтернет-доступу (LMDS - Local Multipoint Distribution System), і радіомости між мережами в своїх стандартах і на своїх частотах, і магістральні канали на релейних станціях. Але корпоративні замовники все частіше віддають перевагу масовим стандартам, в першу чергу з тієї причини, що чим більше поширеним є цей стандарт, тим дешевше обладнання для нього.

Стандарт IEEE 802.11, більш відомий як Wi-Fi, народився в 1999 році як оптимальне рішення проблеми останньої навіть не милі, а скоріше дюйма. Бездротовий радіодоступ, для якого не потрібні ні кабель, ні складні алгоритми модуляції сигналу, майже відразу придбав величезну кількість шанувальників. Чималу роль зіграв той факт, що компанія Intel впровадила адаптер 802.11 в платформу Centrino. На ринку з'явилася велика кількість ноутбуків з Wi-Fi-адаптерами, що, в свою чергу, дало поштовх до розвитку мереж.

Перший базовий стандарт бездротових локальних мереж (Wi-Fi) IEEE 802.11 був розроблений в 1997 році, в 1999 році з'явився перший масовий варіант - IEEE 802.11b. Адаптери 802.11b працюють в неліцензованому діапазоні 2,4 ГГц і забезпечують теоретично максимальну швидкість передачі 11 Мбіт/с на відстань до 300 метрів (теж, зрозуміло, теоретичну межу). Його розвиток - стандарт 802.11g, який повністю сумісний з 802.11b, працює в тому ж частотному діапазоні, максимальна швидкість передачі в стандарті 802.11g становить 54 Мбіт/с. Стандарт 802.11n, прийнятий в 2009 році, працює в діапазонах 2,4-2,5 або 5 ГГц, теоретично можлива швидкість передачі даних збільшена до 600 Мбіт/с. Вже зараз компанія Cisco продає обладнання для бездротової локальної мережі з швидкодією 1 Гбіт/с (802.11ac стандарт; працює в діапазоні 5 ГГц). Існує обладнання стандарту 802.11ac, яке може працювати від 450 Мбіт / с до 6,93 Гбіт / с (802.11n) [6].

Найбільший вибух в бездротових мережах за минулі 10 років зробили стільникові оператори. І зараз, коли ми говоримо про мультисервісні бездротові мережі, у нас в першу чергу спливає термін 4G, що в загальному і цілому характеризує ситуацію.

Що нас чекає в майбутньому? А в майбутньому нас чекає чергове покоління - тепер уже ніхто не сумнівається, що стандарт 5G буде домінувати на ринку бездротових мультисервісних мереж. Картина звичайна: МСЕ поки не визначив критерії стандарту, а виробники, оператори і експерти вже мають свою вагому думку з цього приводу.

У 2016 році Федеральна комісія із зв'язку США дозволила установку базових станцій 5G без додаткового узгодження і виділила частоти: 28 ГГц (27,5-28,35 ГГц), 37 ГГц (37-38,6 ГГц), 39 ГГц (38,6 -40 ГГц), 64-71 ГГц (залишивши можливість в майбутньому додати частоти вище 95 ГГц). Також в минулому році Vodafone і Huawei протестували 5G, розігнавши мережу до 20 Гбіт/с для одного пристрою на частотах 71-76 ГГц, 81-86 ГГц і 92-95 ГГц. Південнокорейський оператор SK Telecom обіцяв організувати 5G-зв'язок до зимової Олімпіади 2018 року, а російський «Мегафон» теж говорить про тестові запуски під час чемпіонату світу з футболу в 2018 році. Ми у свою чергу розуміємо, що чудес не буває, і швидкості досягаються насамперед збільшенням смуги пропускання.

Також збільшується кількість потоків. Технологія MU-MIMO дозволяє одночасно передавати кілька незалежних потоків даних різним користувачам. Можна або збільшувати загальну швидкість передачі, або підвищувати стійкість каналу. MIMO використовується і в LTE, і в Wi-Fi, але в масових моделях кількість потоків не перевищує двох. Massive MIMO - технологія, розроблена для 5G, теоретично дозволяє розміщувати десятки маленьких антен в мобільних пристроях і сотні - в передавальній станції. Для масового застосування очікувана кількість використовуваних потоків - 8 або 16. Робота 5G планується в діапазоні 4.5 ГГц, тобто хвилі мають меншу проникаючу здатність у порівнянні з 2 ГГц у 3G і 2G, і базові станції доведеться ставити частіше. Наприклад, зараз у США встановлено близько 200 тисяч БС, розгортання 5G потребують їх більше мільйона. У цьому є і плюс: буде усунена ситуація перевантаження БС, коли через неї велика кількість абонентів завантажують важкий контент. Але в реальних міських умовах прототипи 5G поки не демонструють результатів, що задовольняють потенційних замовників. До того ж спливають і нетехнічні аспекти: перехід до малих стільників серйозно загострює

проблему численних узгоджень за місцем установки. А це може сильно підвищити ціну і збільшити час розгортання.

Ще одна особливість 5G - підтримка Інтернету речей, технології до якої ми ще повернемось у даній дисертації. Вже досить давно сервіси M2M працюють через стільникові мережі різних поколінь. Але передбачається, що в 5G це не зажадає створення окремих сервісів і додатків, що дозволить різко розширити ринок. Зрозуміло, Інтернет речей - у той же час це одна з яскравих наклейок на 5G для залучення споживачів. Більшості абонентів зараз вистачає з запасом можливостей існуючих мереж 4G, які щойно з'явилися у масовому порядку на території України, тому змусити їх платити за нові технології можна тільки за допомогою принципово нового сервісу, або хоча б того, що можна таким уявити.

Зараз на ринку основна конкуренція розгортається між стільниковими мережами і Wi-Fi. Останній розширює свою присутність, особливо в великих містах, виходячи з локального рівня на міський. У Нью-Йорку в найближчим часом 7500 телефонних будок замінять на гігабітні Wi-Fi (802.11ac) точки. У Лондоні British Telecom планує те ж саме з 750 будками. Для більшої зручності абонентів на цих хот-спотах буде передбачена можливість підзарядки пристроїв з метою популяризувати Wi-Fi технологію ще більше [7].

Єврокомісія зараз вивчає питання надання 120 млн євро на проект WIFI4EU - розгортання безкоштовних Wi-Fi-мереж в громадських місцях по всьому Євросоюзу.

Відстань, на яку проникає сигнал 5G в міській забудові, порівняно з зоною проникнення Wi-Fi, робить конкуренцію між стандартами не такою вже безглуздою. Основною трудностю Wi-Fi в цій конкурентній боротьбі стає той факт, що швидкість 1 Гбіт/с в мережах стандарту 802.11ac реально досягти вкрай важко. Правда, дослідження показали, що гальмом є не недоліки стандарту, а мала пропускна здатність кабелю, яким точка приєднується до магістралі.

У деяких країнах саме Wi-Fi стає більш затребуваним, ніж 3G або 4G. Наприклад, вже в 2015 році в Нідерландах близько трьох чвертей від загального

числа підключень припали на Wi-Fi. І взагалі, в 46 країнах в дослідженнях Open Signal більше половини всіх підключень приходить на Wi-Fi.

Багато експертів вважають, що роботу 5G потрібно використовувати в тандемі з Wi-Fi, забезпечивши безшовне перемикання між мережами з одним пристроєм, однією сім-картою і на одному тарифному плані. Але чи підуть на це оператори?

Відмова 3GPP від співпраці з консорціумом DVB каже, що навряд чи. Стільникові оператори активно просувають LTE-U (Unlicensed) - систему використання LTE в неліцензованому діапазоні (2,4 ГГц, 5,8-5,9 ГГц), тобто там, де зараз працює Wi-Fi. Тому активісти LTE-U (наприклад, компанія Qualcomm) активно просувають випробування спільної роботи LTE-U і Wi-Fi з метою довести, що технології не створюють один одному перешкод. Wi-Fi Alliance, не опираючись відкрито цій ініціативі, намагається створити такі умови, щоб обернути результати випробувань в свою користь.

Стільникові оператори і постачальники технологій шукають рішення, які допоможуть їм у розгортанні великої кількості базових станцій БС. Nokia в цьому році представила концепт F-cell - мікростільники 5G з живленням від сонячних батарей, що забезпечують швидкість 1 Гбіт/с. Встановлюється F-cell за допомогою безпілотних літальних апаратів, наприклад за допомогою квадрокоптера. AT&T заявив про початок робіт за проектом AirGig - бездротової мережі в міліметровому діапазоні, де в якості вишок використовуються опори ЛЕП.

Тенденцію до спільного використання обох технологій проявляють великі соціальні мережі, які останнім часом починають активно будувати власні мережі. У 2016 році Facebook почав випробування безпілотного апарату Aquila, що працює і як базова станція для LTE, і як точка доступу Wi-Fi. Аналогічні розробки просувають Intel, Amazon та Google [8].

Обіцянку «Обрізати кабель з приходом 5G» треба сприймати, звичайно, як кілька перебільшену. Але те, що поступово бездротові мережі стануть домінувати, - безперечно. Показова недавня заява Google Fiber про переорієнтацію на бездротові технології в 12 найбільших містах США, де компанія надає послуги ШСД. Також компанія, можливо, заморозить проекти зі створення гігабітних кабельних мереж.

Google Fiber розкручувала цей проект в ногу з аналогічним проектом AT&T Gigapower. І тільки перехід на бездротові технології, вважають в Google Fiber, дозволить їм витримати конкуренцію з AT&T, в першу чергу за рахунок виграшу за часом розгортання, а відповідне тестування високошвидкісних бездротових технологій радіодоступу дозволило Google Fiber і іншим експертам говорити про появу такого явища, як бездротовий кабель (wireless cable).

1.3. Перспективи використання технології Wi-Fi 802.11n з урахуванням інших стандартів передачі даних

З кожним роком вимоги до мереж передачі даних зростають. Комп'ютери все більше занурюються в море мультимедіа, відео-конференц-зв'язок стає все більш необхідним. Прямо пропорційно зростає вимога до швидкості передачі даних і мобільності користувачів. Cisco зробила важливий крок по виходу на ринок базових високопродуктивних бездротових мереж, анонсувавши нові бездротові точки доступу - Cisco Aironet, що працює за стандартом 802.11n.

Доречно нагадати, що вже давно, з метою розвитку мобільності на підприємствах, компанія підтримує Cisco Motion, що представляє продукт для підтримки мобільних послуг - Mobility Services Engine, який представляє собою ланку, необхідну для підключення бездротових мереж до корпоративних обчислювальних систем. До цього корпоративна бездротова мережа зазвичай була ізольована від решти мереж. Вона мала свої власні системи доступу і безпеки, окремі протоколи управління і термінали, на яких працювали несумісні додатки.

Тим часом, бурхливе розповсюдження бездротових і мобільних пристроїв - смартфонів, планшетів - на споживчому ринку створює передумови для зростання попиту на мобільні функції і в корпоративному середовищі. Згодом мобільність повинна стати невід'ємною частиною корпоративної інформаційно-технологічної інфраструктури.

Щоб ця ідея стала реальністю, на думку фахівців Cisco, традиційні несумісні архітектури дротових і безпроводних мереж повинні поступитися місцем єдиній

уніфікованій мережевій архітектурі, яка надасть співробітникам безпечний доступ до критично важливих ділових додатків, включаючи бази даних з інформацією про замовників і системи управління інвентарними запасами, в будь-якому місці і в будь-який час. Такий перехід від бездротових технологій до мобільності, пояснює віце-президент з маркетингу бездротових мереж Cisco Мацієж Кранц (Maciej Kranz), лежить в основі технології Cisco Motion.

Однако, каже Кранц, якщо корпорації хочуть скористатися всіма перевагами мобільності - вищою продуктивністю праці, підвищенням згуртованості колективів і т.д., - то вони, перш за все, повинні побудувати більш надійну і високопродуктивну бездротову інфраструктуру, здатну підтримати не тільки існуючі мобільні додатки, але і додатки, які з'являться на ринку в найближчі роки. Для цього-то і призначені точки доступу Cisco Aironet і технологія Cisco Motion. Розроблена для офісного середовища точка доступу Cisco Aironet, з останніми конфігураціями 2016 року, являє собою компактний, простий в установці і енергетично ефективний пристрій. Його реальна пропускна здатність, за словами Кранца, перевищує 150 Мбіт / с.

Не будемо повністю прив'язуватися до стратегії компанії Cisco в цьому питанні. Те, що залишається незмінним, це невід'ємна еволюція стандартів 802.11 яка не зупинялась з кінця двадцятого століття. Нижче представлена таблиця 1.1, в якій порівняний стандарт IEEE 802.11n зі своїми попередниками. Як результат, можемо прийти до висновку, що перспективи використання технології Wi-Fi 802.11n нерозривно пов'язані з тим, що специфікації цього стандарту покращувались з року в рік, залишаючи цю технологію дуже привабливою, в тому числі, й для мультисервісного обслуговування.

Таблиця 1.1 Порівняння стандартів 801.11

Характеристики	Специфікації			
	IEEE 802.11b	IEEE 802.11g	IEEE 802.11a	IEEE 802.11n
Швидкість передачі даних	11 Мбіт/с	до 54 Мбіт/с	до 54 Мбіт/с	до 600 Мбіт/с
Обов'язковим є підтримка швидкостей:	1; 2; 5,5; 11 Мбіт/с	1; 2; 5,5; 6; 11; 12 и 24 Мбіт/с (опціональні швидкості 33, 36, 48 и 54 Мбіт/с)	6; 12; 24 Мбіт/с (опціональні швидкості 9; 18; 36; 48; 54 Мбіт/с)	Сумісність з усіма попередніми стандартами, а в контакті з пристроєм, що так само підтримує протокол «n», теоретичний зв'язок до 600Мбіт/с
Число каналів	3, не перекриваються	3, не перекриваються	12, не перекриваються	52 частотних підканалів
Відстань і швидкість передачі даних	У закритих приміщеннях: 30 м (11 Мбіт/с), 91 м (1 Мбіт/с) У відкритих приміщеннях в межах прямої видимості: 120м (11 Мбіт/с), 460м (1 Мбіт/с)	У закритих приміщеннях: 30 м (11 Мбіт/с), 91 м (1 Мбіт/с) У відкритих приміщеннях в межах прямої видимості: 120м (54 Мбіт/с), 460м (1 Мбіт/с)	У закритих приміщеннях: 12 м (54 Мбіт/с), 91 м (6 Мбіт/с) У відкритих приміщеннях в межах прямої видимості: 30м (54 Мбіт/с), 305м (6 Мбіт/с)	Пристрої протоколу можуть працювати в трьох режимах: успадкування (Legacy), в якому забезпечується підтримка пристроїв 802.11b/g і 802.11a; змішаному (Mixed), в якому підтримуються пристрої 802.11b/g, 802.11a і 802.11n; «чистому» режимі - 802.11n
Схема модуляції	Широкопasmової модуляція з прямим розширенням спектра (DSSS)	Мультиплексування з поділом по ортогональних частотах (OFDM)	Мультиплексування з поділом по ортогональних частотах (OFDM)	Ортогональне частотне мультиплексування
Робоча частота	2,4 ГГц (2,4-2,4835 ГГц)	2,4 ГГц (2,4-2,4835 ГГц)	5 ГГц (5,15-5,350 ГГц та 5,725-5,825 ГГц)	2,4—2,5 або 5,0 ГГц
Примітка	Дозвільний порядок був змінений на повідомний	Дозвільний порядок був змінений на повідомний	В Україні цей частотний діапазон використовує ряд державних служб, і до недавнього часу він був заборонений для використання.	Обладнання стандарту 802.11n дозволено до застосування на території України в діапазонах 2400-2483.5, 5150-5350 і 5650-5725 МГц

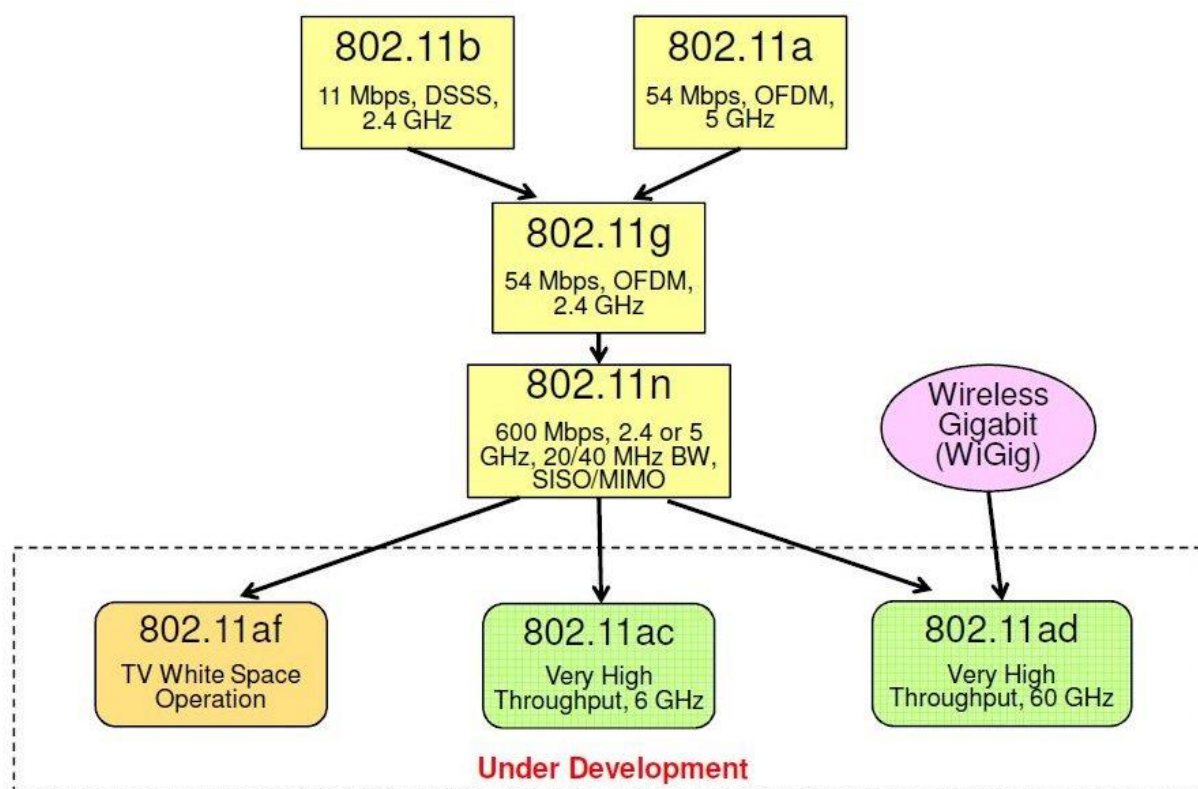


Рисунок 1.1 Еволюція стандарту IEEE 802.11

Особливості стандарту 802.11n: два частотні діапазони. Пристрої стандарту 802.11n можуть працювати в одному з двох діапазонів - 2,4 або 5 ГГц. Це набагато підвищує їх гнучкість при трансформаціях, дозволяючи частично огинати джерела радіочастотних завад. При виборі системи IT-фахівцям слід мати на увазі, що практично всі клієнти 802.11n на основі CardBus і ExpressCard поки розраховані тільки на діапазон 2,4 ГГц, але кілька вбудованих адаптерів і плат типорозміру mini-PCI здатні підтримувати обидва.

Канали шириною 40 МГц: специфікація 802.11n передбачає використання як стандартних каналів шириною 20 МГц, так і широкосмугових - 40 МГц, з більш високою пропускною здатністю. Проект її версії 2.0 рекомендує застосовувати 40-мегагерцові канали тільки в діапазоні 5 ГГц, однак користувачі багатьох пристроїв такого типу отримують можливість вручну переходити на них навіть в діапазоні 2,4 ГГц [9].

MIMO: ключовий компонент стандарту 802.11n під назвою MIMO (Multiple Input, Multiple Output - багато входів, багато виходів) передбачає застосування просторового мультиплексування з метою одночасної передачі декількох

інформаційних потоків по одному каналу, а також багатопроменеве відображення, яке забезпечує доставку кожного біта інформації відповідному одержувачу з невеликою ймовірністю впливу перешкод і втрат даних. Саме можливість одночасної передачі і прийома даних визначає високу пропускну здатність пристроїв 802.11n.

Анени: найчастіше стандартними вважаються антенні конфігурації ланцюга для передачі і прийому інформації 3x3 або 2x3, проте з часом пристрої стандарту 802.11n починають підтримувати і інші варіанти. У простих недорогих моделях буде реалізована схема з однієї передавальної і двох приймаючих ланцюгів (по статистиці абоненти споживають набагато більше даних, ніж передають), тоді як користувачі, яким потрібна дуже велика швидкість передачі даних, зможуть придбати старші моделі з конфігурацією антен 4x4.

Живлення через мережу Ethernet: поширений стандарт електроживлення 802.3af (PoE) не забезпечує потужності, необхідної для електропостачання точок доступу з антенними конфігураціями 3x3 і вище. Йому на зміну вже прийшов стандарт 802.3at, але попри це, виробники бездротових пристроїв вишукують обхідні шляхи вирішення цієї задачі (наприклад, за рахунок автоматичного відключення багаторучевої передачі), а розробники бездротових мікросхем прагнуть знизити споживану потужність своїх чипів.

Вузькі місця в мережі: з урахуванням того, що у перспективних моделей пропускну здатність може перевищити 100 Мбіт/с, творцям бездротових мереж варто подбати про підводи до точки доступу проводового з'єднання Gigabit Ethernet. Поки, звичайно, така смуга пропускання може здатися надмірною для локального користувача, проте з часом, коли навантаження на бездротові мережі збільшиться, нинішні Ethernet-канали цілком можуть стати вузьким місцем на шляху мережевого трафіку.

Агрегація в мережі: коли пропускну здатність кабельного підключення точки бездротового доступу до провідної мережі перевищує 100 Мбіт/с або в цих цілях використовується нова інфраструктура Gigabit Ethernet, вузьким місцем на шляху трафіку загрожує стати бездротовий контролер. Комутатори з дешифруванням і інші

проміжні пристрої можуть бути просто не в змозі обслуговувати стільки ж точок бездротового доступу, як і раніше. Так що, готуючись до розгортання інфраструктури 802.11n, обов'язково потрібно поінтересуватися можливостями бездротового контролера у його виробника.

Зворотня сумісність: розробники специфікації 802.11n подбали про те, щоб компоненти на її базі зберігали сумісність з приладами стандарту 802.11b або 802.11g в діапазоні 2,4 ГГц і з приладами 802.11a - в діапазоні 5 ГГц. У нових мережах 802.11n ще довгий час буде працювати безліч колишніх бездротових клієнтів, так що при розгортанні такої бездротової мережі адміністратору слід обов'язково передбачити їх підтримку [10].

Форма зон WI-FI: традиційно зони бездротових ЛВЗ мають сферичну форму (якщо ніщо не заважає поширенню радіохвиль), проте застосування в стандарті 802.11n технології MIMO і просторового мультиплексування спотворює її і робить менш передбачуваною (форма тут багато в чому залежить від умов навколишнього середовища). У результаті звичний контрольний-вимірний інструментарій, що часто використовується при плануванні мережі, може виявитися непридатним або у всякому разі малоефективним.

Альянс WI-FI: щоб забезпечити якомога вищий рівень сумісності точок доступу і клієнтів стандарту 802.11n, варто всі прошивки і драйвери оновити до версій, сертифікованих альянсом Wi-Fi для 802.11 Draft 2.0 (якщо вони є).

1.4 Місце стандарту IEEE 802.11 в моделі OSI. Характеристики стандарту 802.11n на фізичному та каналному рівнях

Як і всі стандарти IEEE 802, 802.11n працює на двох нижніх рівнях моделі OSI, фізичному і каналному рівні. Будь-який мережевий додаток, мережева операційна система, або протокол (наприклад, TCP/IP), будуть так само добре працювати в мережі 802.11n, як і в мережі Ethernet.

Основна архітектура, особливості та служби 802.11a/b/g/n визначаються в первісному стандарті 802.11. Специфікація 802.11a/b/g/n зачіпає тільки фізичний рівень, додаючи лише вищі швидкості доступу.

Таблиця 1.2 Рівні моделі OSI для Wi-Fi/IEEE 802.11n

Номер рівня	OSI модель	Мережа	Функції
7	Прикладний	-	-
6	Рівень представлення	-	-
5	Сеансовий	-	-
4	Транспортний	-	-
3	Мережевий	-	-
2	Канальний (передачі даних)	Підрівень LLC	Логічне управління, управління доступом
		Підрівень MAC	
1	Фізичний	Підрівень PLCP	Бездротова передача, оцінка стану ефіру
		Підрівень PMD	

802.11 визначає два типи обладнання - клієнт, яким зазвичай є комп'ютер, укомплектований бездротовою мережевою інтерфейсною картою (Network Interface Card, NIC), і точка доступу (Access point, AP), яка виконує роль моста між бездротовою і дротовою мережами. Точка доступу зазвичай містить в собі приймач, інтерфейс провідної мережі (802.3), а також програмне забезпечення, що займається обробкою даних. В якості бездротової станції може виступати ISA, PCI, PC Card або ARD2,4 (ARD5) в стандарті 802.11, або вбудовані рішення, наприклад, телефонна гарнітура 802.11.

Стандарт IEEE 802.11 визначає два режими роботи мережі - режим "Ad-hoc" і клієнт/сервер (або режим інфраструктури - infrastructure mode).

На фізичному рівні визначені два широкосмугових радіочастотних методи передачі і один - в інфрачервоному діапазоні. Радіочастотні методи працюють в ISM-діапазоні 2,4 ГГц і зазвичай використовують смугу 83 МГц від 2,400 ГГц до 2,483 ГГц. Технології широкополосного сигналу, що використовуються в радіочастотних методах, збільшують надійність, пропускну здатність, дозволяють багатьом непов'язаним один з одним пристроїв розділяти одну смугу частот з мінімальними перешкодами один для одного.

Стандарт 802.11 використовує метод прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) і метод частотних стрибків (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). Ці методи кардинально відрізняються, і несумісні один з одним.

Канальний рівень 802.11 складається з двох підрівнів: управління логічним зв'язком (Logical Link Control, LLC) і управління доступом до носія (Media Access Control, MAC). 802.11 використовує той же LLC і 48-бітову адресацію, що і інші мережі 802, що дозволяє легко об'єднувати бездротові і дротові мережі, однак MAC рівень має кардинальні відмінності [11].

MAC рівень 802.11 дуже схожий на реалізований в 802.3, де він підтримує безліч користувачів на загальному носії, коли користувач перевіряє носій перед доступом до нього. Для Ethernet мереж 802.3 використовується протокол Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA / CD), який визначає, як станції Ethernet отримують доступ до провідної лінії, і як вони виявляють і обробляють сутички, що виникають в тому випадку, якщо декілька пристроїв намагаються одночасно встановити зв'язок по мережі. Щоб виявити зіткнення, станція повинна мати здатність і приймати, і передавати одночасно. Стандарт 802.11 передбачає використання напівдуплексних приймачів, тому в бездротових мережах 802.11 станція не може виявити зіткнення під час передачі.

Щоб врахувати цю відмінність, 802.11 використовує модифікований протокол, відомий як Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), або Distributed Coordination Function (DCF). CSMA/CA намагається уникнути зіткнень шляхом використання явного підтвердження пакета (ACK), що означає, що

приймаюча станція посилає АСК пакет для підтвердження того, що пакет отриманий неушкодженим.

CSMA/CA працює наступним чином. Станція, яка бажає передавати, тестує канал, і якщо не виявлено активності, станція очікує протягом деякого випадкового проміжку часу, а потім передає, якщо середовище передачі даних все ще вільна. Якщо пакет приходить цілим, приймаюча станція посилає пакет АСК, по прийомі якого відправником завершується процес передачі. Якщо передавальна станція не отримала пакет АСК, в силу того, що не була отримана пакет даних, або прийшов пошкоджений АСК, робиться припущення, що відбулося зіткнення, і пакет даних передається знову через випадковий проміжок часу [12].

Для визначення того, чи є канал вільним, використовується алгоритм оцінки чистоти каналу (Channel Clearance Algorithm, CCA). Його суть полягає в вимірі енергії сигналу на антені і визначення потужності прийнятого сигналу (RSSI). Якщо потужність прийнятого сигналу нижче певного порогу, то канал оголошується вільним, і MAC рівень отримує статус CTS. Якщо потужність вище порогового значення, передача даних затримується відповідно до правил протоколу. Стандарт надає ще одну можливість визначення незайнятості каналу, яка може використовуватися або окремо, або разом з вимірюванням RSSI - метод перевірки несучої. Цей метод є більш вибіркоvim, так як з його допомогою виробляється перевірка на той же тип несучої, що і за специфікацією 802.11. Найкращий метод для використання залежить від того, який рівень перешкод в робочій області. Таким чином, CSMA/CA надає спосіб поділу доступу по радіоканалу.

Механізм явного підтвердження ефективно вирішує проблеми перешкод. Однак він додає деякі додаткові накладні витрати, яких немає в 802.3, тому мережі 802.11 будуть завжди працювати повільніше, ніж еквівалентні їм Ethernet локальні мережі.

Інша специфічна проблема MAC-рівня - це проблема "прихованої точки", коли дві станції можуть обидві "чути" точку доступу, але не можуть "чути" один одного, в силу великої відстані або перешкод. Для вирішення цієї проблеми в 802.11 на MAC рівні доданий необов'язковий протокол Request to Send / Clear to Send (RTS/CTS). Коли використовується цей протокол, що посилає станція передає RTS і

чекає відповіді точки доступу з CTS. Так як всі станції в мережі можуть "чути" точку доступу, сигнал CTS змушує їх відкласти свої передачі, що дозволяє передавальній станції передати дані і отримати ACK пакет без можливості зіткнень. Так як RTS/CTS додає додаткові накладні витрати на мережу, тимчасово резервуючи носій, він зазвичай використовується тільки для пакетів дуже великого обсягу, для яких повторна передача була б надто дорогим [13].

Нарешті, MAC рівень 802.11 надає можливість розрахунку CRC і фрагментації пакетів. Кожен пакет має свою контрольну суму CRC, яка розраховується і прикріплюється до пакету. Тут спостерігається відміна від мереж Ethernet, в яких обробкою помилок займаються протоколи більш високого рівня (наприклад, TCP). Фрагментація пакетів дозволяє розбивати великі пакети на більш маленькі при передачі по радіоканалу, що корисно в дуже "заселених" середовищах або в тих випадках, коли існують значні перешкоди, так як у менших пакетів менші шанси бути пошкодженими. Цей метод в більшості випадків зменшує необхідність повторної передачі і, таким чином, збільшує продуктивність всієї бездротової мережі. MAC рівень відповідальний за збірку отриманих фрагментів, роблячи цей процес "прозорим" для протоколів більш високого рівня.

Висновки до розділу 1

В даному розділі роботи досліджені тенденції розвитку телекомунікаційних безпроводових мереж. Виходячи з цього та проаналізувавши сучасні технології побудови цих мереж, можна прийти до висновку, що всі сучасні технології: Wi-Fi, LTE і майбутні 5G-стандарти є актуальними на сьогоднішній момент. Попри відмінності між цими технологіями, кожна з них знайшла свою нішу у світі телекомунікацій, а в деяких технологічних рішеннях вони співіснують.

Детально розглянута технологія Wi-Fi IEEE 802.11. Виконано порівняння стандартів цієї технології, розглянуто місце цього стандарту в моделі OSI та надана характеристика стандарту 802.11n на фізичному та каналному рівнях.

РОЗДІЛ 2. МУЛЬТИСЕРВІСНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ НА ОСНОВІ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ IEEE 802.11

2.1 Моделювання мультисервісної мережі з узагальненою схемою резервування каналного ресурсу

Резервування є однією з найбільш зручних і дієвих схем впливу на значення характеристик спільної передачі повідомлень по цифрових лініях. Процедuru резервування відносно легко реалізувати технічно. Для оцінки ефекту, який надає резервування на значення показників обслуговування заявок, розвинені відповідні розрахункові методики. Суть даного способу надання переваги в передачі полягає в наступному: з кожним потоком заявок зв'язується ціле число θ_k , зване порогом резервування для повідомлень k -го потоку. При надходженні повідомлення k -го потоку з'ясовується, як багато ресурсу лінії зайнято передачею повідомлень всіх типів [14].

Позначимо цю величину символом r . Якщо виконується нерівність $r > \theta_k$, то повідомлення, яке надійшло, k -го потоку вважається втраченим і не може бути поновлено. В іншому випадку повідомлення приймається до передачі. Встановлюючи величину θ_k , оператор отримує можливість зарезервувати ресурс лінії для тих потоків, яким він потрібен в більшій кількості. Розглянемо розширення схеми розподілу каналного ресурсу.

Узагальнена схема резервування: дія узагальненої схеми резервування моделюється з використанням поняття функції внутрішньої блокування. Відповідна функція для кожної надійшла заявки задає ймовірність відмови в обслуговуванні, залежить від загального числа зайнятих каналних одиниць. Варіюючи значення ймовірності можна досліджувати різні схеми розподілу вільної каналної ємності в мультисервісних мережах.

До найбільш відомих відноситься традиційна схема резервування ресурсу для пріоритетних заявок. В цьому випадку при надходженні заявки пріоритетного потоку вона приймається до обслуговування при наявності достатнього обсягу

канального ресурсу. Якщо надходить заявка, що не має пріоритет, то при перевищенні певного рівня завантаження ресурсу, вона отримає відмову навіть при наявності ресурсу, достатнього для її передачі. Можливість прийому заявки до обслуговування моделюється за допомогою ймовірності внутрішньої блокування, що залежить від числа встановлених з'єднань, тобто від обсягу зайнятого ресурсу [15].

Інша схема розподілу канального ресурсу, яку можна досліджувати з використанням поняття внутрішньої блокування, реалізується в мережах мобільного зв'язку 3-го покоління Universal Mobile Telecommunication System (UMTS). Передача інформації в мережах даного типу відбувається з використанням технології Wide-Band Code Division Multiple Access (WCDMA), яка дозволяє одночасно в одній і тій же смузі частот вести передачу багатьом користувачам. На відміну від мереж на базі технології GSM, в мережах, побудованих із застосуванням WCDMA передача інформації певного користувача для інших користувачів, що використовують той же радіоінтерфейс, являє собою шум. Кожен раз, коли відбувається прийом нової заявки, відношення сигнал-шум для вже встановлених з'єднань зменшується.

З цієї причини в мережах, що використовують технологію WCDMA, немає жорсткого обмеження на обсяг канального ресурсу. Щоб зберегти на прийнятному рівні показники QoS для вже встановлених з'єднань, заявка, що щойно надійшла, отримує відмову в обслуговуванні, якщо нове з'єднання збільшить рівень шуму для встановлених з'єднань вище деякого прийнятного рівня. Чисельне значення рівня залежить від числа вже встановлених з'єднань. Таким чином, формально можливість прийому нової заявки також може бути описана з використанням ймовірності внутрішньої блокування, яка залежить від кількості встановлених з'єднань, тобто від обсягу зайнятого ресурсу.

Обговоримо основні передумови, необхідні для побудови математичної моделі мультисервісної мережі з узагальненою схемою резервування канального ресурсу.

Основна передатна одиниця: поняття основної передавальної одиниці тісно пов'язане з поняттям ефективної інтенсивності інформаційного потоку. В теорії телетрафіку мультисервісних мереж воно використовується для оцінки потреби в

ресурсі при пакетної передачі імпульсного трафіку. Значення ефективної інтенсивності дозволяє чисельно оцінити ефект статистичного мультиплексування, характерного для пакетної технології передачі, і дає можливість розрахувати максимально можливе число з'єднань певного виду при фіксованій частці втрат інформаційних осередків. Тим самим з'являється можливість оцінити мінімально необхідну швидкість лінії в заданому напрямку. Існує досить багато теоретичних робіт, спрямованих на вивчення цієї характеристики інформаційного потоку. Позначимо через α ефективну інтенсивність джерела.

На практиці значення α обчислюється на основі характеристик трафіку: середньої (m) і пікової (h) інтенсивностей надходження інформації, швидкості лінії C і обмежень на якість передачі в формі частки втрачених осередків P_{loss} . Нехай величини x , y визначаються з виразів:

$$\begin{aligned} x &= -\frac{2t}{C} \log_{10} P_{loss}, \\ y &= 1 - \frac{1}{50} \log_{10} P_{loss} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Тоді ефективна інтенсивність джерела α знаходиться з наступного емпіричного співвідношення:

$$\alpha = \begin{cases} ym \left(1 + 3x \left(1 - \frac{m}{h} \right) \right), & \text{якщо } 3x \leq \min \left(3, \frac{h}{m} \right), \\ ym \left(1 + 3x^2 \left(1 - \frac{m}{h} \right) \right), & \text{якщо } 3 < 3x^2 \leq \frac{h}{m}, \\ h, & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (2.2)$$

Наведемо значення ефективної інтенсивності для найбільш популярних телекомунікаційних додатків. При передачі голосових повідомлень значення пікової, середньої і ефективної інтенсивностей рівні, відповідно, 64, 25 і 30 кбіт/с. При передачі відеоповідомлень (кодек H.263 – відносно висока якість) значення

пікової, середньої і ефективної інтенсивностей рівні, відповідно, 1400, 256 і 1000 кбіт/с. Наближені значення ефективної інтенсивностей, отримані з використанням вищекванзованого виразу, для цих видів телекомунікаційних додатків рівні, відповідно, 30 і 1005 кбіт / с.

Як вже було сказано, поняття ефективної інтенсивності джерела дає можливість переформулювати задачу оцінки частки заявок, яким відмовлено у виділенні каналного ресурсу в термінах визначення значень блокувань для багатопотокових мереж комутації каналів, що розглядаються в рамках моделей з явними втратами повідомлень. Для використання відповідної методології необхідно ввести поняття основної передавальної одиниці. Назвемо основною передавальною одиницею найбільший спільний дільник цілочисельних значень швидкостей всіх цифрових ліній, наявних в мережі, і вимог до швидкостей обслуговування, кожного з n наявних в мережі потоків повідомлень [16].

У практичних розробках вибір основної передавальної одиниці залежить від детальності опису процесу поділу ресурсу. Якщо аналізується процес формування абонентського трафіку, то зазвичай в якості основної передавальної одиниці виступає швидкість 64 кбіт/с, яка, як відомо, забезпечує якісну передачу мовного навантаження, що відноситься до однієї розмови (відзначимо, що використання вокодерів може зменшити це значення до 32, 16 і навіть 8 кбіт/с, якщо це вітально необхідно за певних обставин). На транзитній ділянці мережі передається агрегований трафік. Тут в якості основної передавальної одиниці може бути обрана швидкість цифрового інтерфейсу E1, рівна 2,048 Мбіт/с, що забезпечується системою передачі ІКМ 30/32 або швидкість, що задана початковим модулем синхронної цифрової ієрархії STM-1 155 Мбіт/с.

Таким чином, для оцінки показників якості обслуговування інформаційних потоків, що розглядаються на рівні з'єднання, однорідних до якості обслуговування і переданих з використанням пакетних технологій, що забезпечують побудову віртуальних каналів, можна використовувати моделі, раніше застосовувані в теорії телетрафіка для оцінки характеристик мереж комутації каналів з явними втратами

заблокованих викликів. Аналогом каналу в уже згадуваному випадку буде основна передавальна одиниця.

Щодо моделі потоку заявок, відповідно зі сформульованими припущеннями аналіз процесу передачі інформації в досліджуваній моделі мережі відбувається на рівні з'єднання. Для побудови моделі необхідно визначити модель надходження заявок на виділення каналного ресурсу уздовж всього передбачуваного маршруту слідування інформаційного потоку. З положень теорії ймовірностей відомо, що при підсумовуванні великого числа незалежних потоків заявок з інтенсивностями, які прагнуть до нуля, результуючий потік за властивостями буде наближатися до пуассонівського потоку, якщо число потоків прямує до нескінченності, а їх сумарна інтенсивність до константи. Припущення про пуассонівський характер вхідних потоків заявок є одним з головних постулатів теорії телетрафіку і на його основі отримано багато основоположних результатів, які використовуються при плануванні мережевих ресурсів традиційних мереж комутації каналів [17].

Будемо вважати, для даного сегменту мультисервісної мережі виконуються припущення про можливість використання пуассонівської моделі вхідного потоку заявок з інтенсивністю надходження заявок і потребами в каналному ресурсі залежними від номера потоку. Зрозуміло, що для мультисервісних мереж виконання даного припущення може порушуватися. У цій ситуації для реконструкції вхідного потоку можна використовувати ряд узагальнень пуассонівської моделі, які, з одного боку, дозволяють врахувати зазначену специфіку спільної передачі інформаційних потоків в мультисервісних мережах, а з іншого боку, зберегти легкість оцінки показників обслуговування, характерну для пуассонівської моделі. До таких узагальнень відносяться модель з кінцевим числом джерел навантаження і модель з урахуванням ефекту повторних викликів. Вони дозволяють врахувати неоднорідний характер надходження потоків заявок і залежність інтенсивності потоку від ступеню завантаження каналного ресурсу.

Модель заняття каналного ресурсу включає наступні положення: час заняття каналного ресурсу на передачу інформації, що відноситься до одного з'єднання,

визначається статистичними властивостями джерела трафіку і використаною дисципліною розподілу вільного ресурсу. З результатів теорії телетрафіка відомо, що при виконанні пуассонівського припущення про моменти надходження заявок на виділення каналного ресурсу і використання моделі з явними втратами заявок, тип функції розподілу часу утримування каналного ресурсу не впливає на значення ймовірностей стаціонарних станів і, відповідно, показників спільної передачі повідомлень.

Для даної моделі використання ресурсу, коли ймовірність його заняття залежить від числа вже зайнятих каналів, властивість мультипликативності не виконується. Тому припустимо, що час утримування каналного ресурсу має експоненціальний розподіл з параметром, що залежить від номера потоку. У дослідній моделі тривалість випадкового часу утримування ресурсу визначається обраною функцією розподілу, і не залежить від процесу передачі інформації в даному з'єднанні і від ступеня завантаження даного сегменту мережі. Можна розглянути й інші моделі, коли тривалість часу заняття передавального ресурсу збільшується або зменшується в залежності від завантаження мережі і визначається використовуваними механізмами контролю QoS. Відповідні схеми заняття ресурсу описуються досить складними моделями і нами розглядатися не будуть, бо вони виходять за рамки дослідження мультисервісних мереж в нашому розумінні [18].

Математична модель включає в себе певну кількість вузлів, пов'язаних між собою цифровими лініями. Пронумеруємо наявні лінії цифрами від 1 до J . Позначимо через R_k безліч номерів ліній, використовуваних при встановленні з'єднання k -им викликом, а через N_j позначимо безліч номерів потоків, чиї виклики при встановленні з'єднання використовують j -у лінію. Відповідно до обговорення, наведеними в попередньому підрозділі, позначимо через V_j швидкість передачі j -ої лінії $j = 1, \dots, J$, виражену в одиницях ресурсу, необхідного для обслуговування вхідних повідомлень. Передбачається, що в мережі передаються n інформаційних потоків, породжені різноманітними комунікаційними додатками: мовні повідомлення, дані, відео тощо. Пронумеруємо потоки, що надходять, цифрами від 1 до n .

Позначимо через λ_k інтенсивність надходження k -го потоку заявок на виділення каналного ресурсу. Будемо також припускати, що час передачі повідомлення для кожного з потоків має експоненціальне розподіл з параметром μ_k . Рух повідомлення по мережі характеризується маршрутом, який складається з номерів ліній, використовуваних для обслуговування. Будемо припускати, що для обслуговування заявки конкретного потоку використовується однакове число одиниць ресурсу на всіх цифрових лініях, що входять в маршрут прямування повідомлення. Для формального представлення маршрутів слідування всіх повідомлень вводиться поняття маршрутної матриці $R=||r_{j,k}||$ прямокутного виду розміру $[J \times n]$, компоненти матриці мають вигляд:

$$R = \begin{vmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & \dots & r_{1,n-1} & r_{1,n} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & \dots & r_{2,n-1} & r_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ r_{J,1} & r_{J,2} & r_{J,3} & \dots & r_{J,n-1} & r_{J,n} \end{vmatrix}. \quad (2.3)$$

Кожен рядок матриці $R=||r_{j,k}||$ показує, які потоки використовують конкретну лінію для передачі своїх повідомлень, скільки при цьому одиниць ресурсу лінії їм потрібно, а кожен стовпець матриці вказує перелік ліній, що відходять конкретному потоку для передачі своїх повідомлень.

В якості прикладу на рисунку нижче приведена схема мережі з 7 вузлів і 6 з'єднувальних ліній. По мережі ведеться передача повідомлень 6 інформаційних потоків. Маршрути прямування повідомлень задаються наступним переліком вузлів: перший - 142, другий - 243, третій - 146, четвертий - 3457, п'ятий - 657, шостий - 345. Маршрутна матриця R , відповідна обраної топології мережі і маршрутами прямування інформаційних потоків має вигляд:

$$R = \begin{vmatrix} b_1 & 0 & b_3 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & b_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & b_4 & 0 & b_6 \\ 0 & 0 & b_3 & b_4 & 0 & b_6 \\ 0 & 0 & b_3 & 0 & b_5 & b_6 \\ 0 & 0 & 0 & b_4 & b_5 & 0 \end{vmatrix} \quad (2.4)$$

Позначимо через i_k число повідомлень k -го потоку інформаційного навантаження, які перебувають на передачі. Число повідомлень всіх потоків, які перебувають на обслуговуванні, задається вектором (i_1, i_2, \dots, i_n) , на компоненти якого необхідно накласти обмеження, пов'язані з можливостями одночасної передачі декількох повідомлень по окремих ланках мережі. Необхідно, щоб передавальний ресурс кожної лінії, зайнятий викликами всіх потоків, що мають доступ до даної лінії і знаходяться на передачу в стані (i_1, i_2, \dots, i_n) , не перевищував її швидкості, вираженої в умовних передавальних одиницях. Відповідні нерівності мають вигляд:

$$\sum_{j \in R_k} i_j b_j \leq v_k, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (2.5)$$

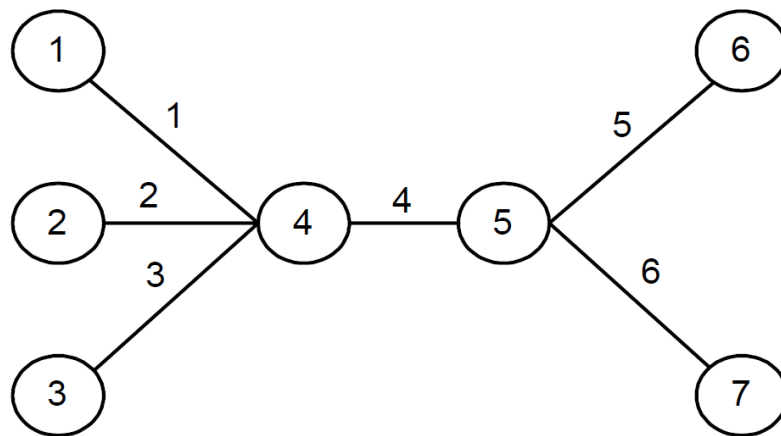


Рисунок 2.1 Модель мережі з 7 вузлів, 6 з'єднувальних ліній, по якій передається повідомлення 6 інформаційних потоків

Позначимо безліч станів (i_1, i_2, \dots, i_n) , що задовольняють наведеним вище рівності, через Ω . Дане множество задає безліч всіх теоретично можливих станів досліджуваної моделі мережі. Реально використовуваний простір станів може бути лише підмножиною Ω . Позначимо його через S . Конкретний вид підмножини S визначається вибором функції внутрішнього блокування, яка для кожного стану залежить від об'єму ресурсу, зайнятого на кожній ланці мережі. Позначимо через $N_j(i_1, i_2, \dots, i_n)$ для кожного стану (i_1, i_2, \dots, i_n) , що входить в S , безліч номерів потоків, які використовують j -у лінію в стані (i_1, i_2, \dots, i_n) для передачі своїх

повідомлень. Нехай $r_j(i_1, i_2, \dots, i_n)$ - обсяг каналного ресурсу j -ої лінії, зайнятого в стані (i_1, i_2, \dots, i_n) на передачу повідомлень всіх потоків. Значення $r_j(i_1, i_2, \dots, i_n)$ визначається з виразу:

$$r_j(i_1, i_2, \dots, i_n) = \sum_{k \in N_j(i_1, i_2, \dots, i_n)} i_k b_k, \quad j = 1, \dots, J. \quad (2.6)$$

Таким чином, для досліджуваної моделі мережі, значення функції блокування для заявок k -го потоку $\phi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)$ визначається для кожного можливого стану $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S$ відповідно до значень обсягу каналного ресурсу $r_j(i_1, i_2, \dots, i_n)$, зайнятого на кожній ланці мережі. Поступивши в один з можливих станів $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S$ заявка k -го потоку буде прийнята до передачі з ймовірністю $\phi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)$ і з додатковою можливістю $1 - \phi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)$ надійшовши заявка отримує відмову і не може бути поновлена ні в якій формі. Зрозуміло, що залежність функції $\phi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)$ від компонент стану (i_1, i_2, \dots, i_n) не може бути довільною. Зокрема, якщо в стані (i_1, i_2, \dots, i_n) для будь-якої лінії, яка становить маршрут слідування повідомлень k -го потоку, немає b_k вільних одиниць передавального ресурсу, то надійшовши заявка отримує відмову з ймовірністю рівній одиниці [19].

Слід також зазначити, що можливість використання функції внутрішнього блокування для реалізації схем резервування дозволяє ввести поняття «м'якого резервування», коли відмова в прийомі заявки через перевищення порога резервування здійснюється не з ймовірністю рівній одиниці, як в класичному випадку (його можна назвати "жорстке резервування"), а з меншою ймовірністю. При цьому значення ймовірності може залежати від обсягу зайнятого ресурсу. Тобто, в ситуації коли обсяг зайнятого ресурсу перевищено незначно, частина неперіоритетних заявок зберігає можливість потрапляння на обслуговування. Таким чином, при реалізації схем "м'якого резервування" також відбувається резервування ресурсу для пріоритетних потоків, але при цьому зберігається можливість прийому до обслуговування неперіоритетних заявок.

Чисельні дослідження моделі показують, що побудована модель дозволяє досліджувати ряд важливих положень, що відносяться до використання узагальненої

схеми резервування. Перевіримо з використанням імітаційного моделювання припущення про те, що для моделі мультисервісної мережі з узагальненою схемою резервування каналного ресурсу значення показників обслуговування в слабкому ступені залежать від типу функції розподілу часу утримування каналного ресурсу. Залежність буде проявлятися тільки через значення середнього часу утримування ресурсу на передачу повідомлення. В якості об'єкту проведення обчислень виберемо модель мережі зв'язку (одне звено) з параметрами: $v=50$, $n=3$, $b_1=1$, $b_2=3$, $b_3=6$, $\alpha_k=1$, $\lambda_k = \nu\rho/nb_k$, $k=1,2,3$. Тут і далі при розгляді численних прикладів значення $v=50$ виражено в основних передавальних (канальних) одиницях. Час обслуговування заявки для зручності прийнято за одиницю. Таким чином, інтенсивності надходження заявок виражені в ерлангах. Величина ρ показує інтенсивність надходження заявок загального потоку в ерлангах на одну каналну одиницю [20].

Розглянемо чотири типи функції розподілу часу утримування каналного ресурсу, які пронумеруємо в порядку зростання дисперсії: детермінований, суміш детермінованого і експоненціального, експоненціальний і гіперекспоненціальний. Будемо припускати, що для всіх розглянутих функцій розподілу випадкової тривалості часу утримування каналного ресурсу ξ на передачу повідомлення, середнє значення відповідного часу дорівнює одиниці. Відповідно до обраних параметрів значення дисперсій: 0, 1/2, 1, 10. Реалізація схеми резервування задається ймовірністю внутрішнього блокування:

$$\begin{aligned} \varphi_{k,i} &= \frac{i^{10}}{v^{10}}, \quad i=0,1,\dots,k-b_k, \quad \varphi_{k,i}=1, \\ i &= k-b_k+1,\dots,v, \quad k=1,2,3. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Порівняння залежності частки відмов у виділенні каналного ресурсу для моделі з узагальненою схемою резервування від зміни завантаження на одну каналну одиницю для різних функцій розподілу тривалості заняття каналного ресурсу показано в таблиці, де наведені значення π_1 , π_2 , π_3 , пораховані при виконанні припущення про експоненціальний характер розподілу часу утримування ресурсу (базовий варіант, який використовувався при побудові моделі) і однієї з трьох

відібраних для порівняння функцій розподілу. У таблиці наведено дані для детермінованого розподілу. Для інших функцій розподілу висновки ті ж.

Отримані чисельні дані дозволяють зробити висновок про слабку залежність частки відмов у виділенні каналного ресурсу при реалізації схем резервування від типу функції розподілу часу утримування каналного ресурсу. Відносне значення різниці в значеннях показників становить величину порядку одного відсотка в досить широкому діапазоні зміни інтенсивності вхідного потоку заявок. Це дуже важливий результат, який дозволяє використовувати при побудові моделі припущення про експоненційний характер розподілу часу утримування каналного ресурсу. При виконанні даного припущення побудована модель описується марковским процесом. Ця якість значно полегшує оцінку показників обслуговування заявок, яку можна виконати з використанням складання та подальшого вирішення систем рівнянь статистичної рівноваги [21].

Таблиця 2.1 Значення частки відмов у виділенні каналного ресурсу для моделі з узагальненою схемою резервування від зміни завантаження на одну каналну одиницю для різних функцій розподілу тривалості заняття каналного ресурсу (Експоненціальний розподіл і детермінований)

ρ	Експоненціальна модель			Детермінована модель		
	π_1	π_2	π_3	π_1	π_2	π_3
0,50	0,0187	0,0195	0,0248	0,0189	0,0194	0,0248
0,55	0,0289	0,0302	0,0392	0,0287	0,0298	0,0392
0,60	0,0415	0,0437	0,0576	0,0416	0,0434	0,0571
0,65	0,0565	0,0597	0,0799	0,0563	0,0600	0,0790
0,70	0,0733	0,0779	0,1054	0,0728	0,0772	0,1047
0,75	0,0915	0,0977	0,1335	0,0908	0,0971	0,1333
0,80	0,1106	0,1186	0,1634	0,1102	0,1185	0,1635
0,85	0,1301	0,1402	0,1944	0,1297	0,1399	0,1936
0,90	0,1498	0,1621	0,2258	0,1495	0,1618	0,2256
0,95	0,1694	0,1840	0,2572	0,1693	0,1839	0,2569

Таким чином, Побудована модель мультисервісної мережі зв'язку з узагальненою схемою резервування каналного ресурсу. Модель може бути застосована для оцінки характеристик спільного обслуговування довільного числа потоків повідомлень, як на рівні доступу, так і на рівні транспортного ядра. Показано, що значення показників обслуговування заявочка виділення каналного ресурсу в слабкому ступені залежать від типу функції розподілу часу утримування каналного ресурсу. Залежність проявляється тільки через значення середнього часу утримування ресурсу на передачу повідомлення. Цей результат також може служити підставою для вибору при побудові моделі припущення по експоненційному характері розподілу часу утримування каналного ресурсу і подальшого використання методів оцінки показників, заснованих на результатах, отриманих для марковських моделей.

2.2 Якість сервісу в мультисервісних мережах

На думку експертів, QoS може стати «вододілом» між постачальниками сервісних служб. Однак угода по ключовим складовим і поняттям, які належать до сервісних служб, - важлива передумова для формування стандартизованих сервісних пропозицій - яку все ще не досягнуто.

Наприклад, сам термін QoS часто неправильно використовується навіть людьми, які професійно займаються мережевими технологіями, тобто QoS рекламується як набір функцій, що визначають клас обслуговування (class of service, CoS).

Спробуємо внести деяку ясність: термін «клас обслуговування» визначає більш-менш стандартизований набір функцій, що характеризують певну службу (service) або набір служб (service package). «Якість сервісу» (quality of service, QoS) - більш точний термін, в основному використовується для визначення набору вимірюваних параметрів сервісу. У IP-мережі QoS може представлятися, наприклад, продуктивністю передачі IP-пакетів через одну або більше число мереж [22].

Крім завдань по збільшенню продуктивності і надійності мереж, постачальники мережевих сервісів прагнуть до надання користувачеві «наскрізного» (end-to-end), гарантованого якості сервісу для передачі різних типів даних, включаючи відео, мультимедіа та голос.

В якості першого кроку до досягнення поставленої мети необхідно визначення невеликого набору вимірюваних параметрів, що характеризують якість сервісу і можливості постачальників мережевих сервісів - сервіс-провайдерів. Розглянемо ці параметри:

- готовність сервісу (service availability). Визначає надійність з'єднань користувачів з сервіс-провайдером;
- затримка (delay). Характеризує інтервал між прийомом і передачею пакетів;
- варіація, або флуктуація, затримки (jitter). Параметр, що описує можливі відхилення від часу затримки при передачі пакетів;
- продуктивність, або пропускна здатність (throughput) - швидкість передачі пакетів в мережі; виділяють середню (average rate) і пікову (peak rate) швидкості;
- швидкість втрати пакетів (packet loss rate) - максимальна швидкість, на якій пакети можуть бути відкинуті під час передачі по мережі; втрата пакетів зазвичай відбувається внаслідок перевантажень мережі (congestion).

Отже, важливою частиною майбутніх мереж повинні стати механізми підвищення якості сервісу мережі. Завдання полягає в тому, щоб забезпечити на всьому протязі мережі, незалежно від її масштабів і використовуваних протоколів, гарантовану доставку даних в рамках певних фіксованих параметрів передачі. Такими параметрами є готовність сервісу, затримка, варіація затримки, пропускна здатність і швидкість втрати пакетів [23].

Надання провайдерами гарантованих служб доставки різних даних можливо тільки на базі мереж, що підтримують QoS і володіють можливостями для конфігурації, управління і підтримки необхідної ефективності мережі.

Відомі дві архітектури QoS - на базі інтегрованих служб (Integrated Services Architecture, Int-Serv) і на базі диференційованих служб (Differentiated Services Framework, Diff-Serv), - які визначаються в даний час IETF.

Int-Serv орієнтована на периферійне мережеве обладнання. Більш масштабується, ніж Int-Serv, архітектура Diff-Serv використовується в магістральній частини глобальних мереж і грає ключову роль в мережах сервіс-провайдерів. Розглянемо архітектури QoS більш детально.

Модель з інтегрованими службами (Int-Serv) була визначена в RFC 1633 спільно з протоколом резервування ресурсів (RSVP) в якості робочого сигнального протоколу. Цей протокол використовується з метою резервування ресурсів для кожного потоку, що потребує певної якості сервісу, в маршрутизаторах мережі на основі «наскрізних» параметрів сигналізації.

Універсальність - ключовий аспект архітектури Int-Serv - вимагає визначення «наскрізних» параметрів сигналізації і підтримки «м'якого» стану потоку (per-flow soft state) в кожному маршрутизаторі на всьому шляху. «М'якість» стану визначається тимчасовим характером зарезервованого ресурсу і необхідністю періодичних оновлень за допомогою RSVP-повідомлень. Інші аспекти стосуються питань вирішення та управління пріоритетами запитів про резервування ресурсів, а також вирішення проблеми резервування в разі відсутності підтримки протоколу сигналізації деякими пристроями мережі.

Модель з інтегрованими службами (Int-Serv) для архітектури IP QoS визначає три класи обслуговування [24]:

- гарантується обслуговування (guaranteed service) характеризується гарантованою пропускну здатністю і фіксованою затримкою (визначено в документі RFC 2212).

- Максимально доступне якість (best-effort) - служба, що надає якість сервісу, порівнянне з тим, що в даний час забезпечує Інтернет при різних ступенях завантаження мережі (від невеликої до критичної).

- Контрольована завантаження (controlled load service) адаптує службу з максимально доступним якістю до мереж з невеликим завантаженням (визначена в документі RFC 2211).

Найбільш імовірним місцем підтримки моделі Int-Serv стане периферія мережі, де потоки можуть управлятися на призначеному для користувача рівні.

Diff-Serv - відносно нова робоча група IETF, яка визначила більш масштабовану архітектуру IP QoS для застосування в мережах постачальників мережевих послуг і магістральних мережах.

У Diff-Serv в порівнянні з раніше розглянутої архітектурою акцент більшою мірою зроблений не на сигналізації, а на способах обробки потоків в кожній ділянці мережі на основі певних класів. Потоки згідно визначеним правилам класифікуються таким чином, що безліч прикладних потоків об'єднується в обмежений набір класифікованих потоків.

Трафики, що входять в мережевий домен через периферійний маршрутизатор (ER), спочатку класифікуються, потім передаються через транзитні маршрутизатори (TR) мережі, де по черзі обробляються відповідно до присвоєним класом.

Восьмирозрядному полю типу сервісу (ToS) в IPv4 використовується для повідомлення низхідних (downstream) маршрутизаторів про необхідний рівень обслуговування кожного прийнятого пакета. У Diff-Serv це поле перейменовано в поле «диференційовані послуги» (Differentiated Services, DS).

Diff-Serv бере керування ToS-полем і відводить йому таку просту роль, що виробники мережевого обладнання зможуть розробляти конфігурується QoS-обладнання, здатне інтерпретувати бітову комбінацію даного поля для управління поведінкою переданого потоку.

Diff-Serv визначає також архітектурні особливості, що забезпечують функції QoS за межами мережевого домену.

Модель Diff-Serv більш масштабируема, ніж Int-Serv, тому що управляє агрегованими потоками і мінімізує витрати на сигналізацію, уникаючи, таким чином, складнощів визначення «м'яких» станів потоку в кожному вузлі.

Однак, ймовірно, знайдуться домени, де Int-Serv і Diff-Serv будуть співіснувати, тому необхідна розробка правил їх взаємодії на кордонах. Ці правила повинні будуть визначити способи перетворення індивідуальних потоків в класифіковані потоки для транспортування через домен Diff-Serv.

Найбільш логічно перекласти відповідальність за прив'язку трафіку до класів на користувача, проте в деяких ситуаціях при зміні меж домену сервіс-провайдери можуть виконувати цю роль від його імені.

Diff-Serv створює основу для IP QoS, але самотійно не є повністю закінчену архітектуру QoS.

Загалом, Diff-Serv поводить себе як «полегшений» механізм сигналізації між кордонами домену і мережевими вузлами, несучи інформацію про клас обслуговування пакетів [25].

Механізми формування та обслуговування черг в маршрутизаторах і комутаторах грають життєво важливу роль в забезпеченні якості сервісу. Найбільш широко відомі такі механізми:

- «Першим увійшов, першим вийшов» (First-In First-Out, FIFO) - обслуговування в порядку надходження пакетів - найбільш простий для реалізації підхід. Однак при використанні даного механізму пакет з високим пріоритетом може довго чекати своєї черги.

- «Суворий облік пріоритетів» (Strict priority scheduling) - обслуговування пакетів певного класу проводиться лише в тому випадку, коли відсутні черги пакетів більш високого класу. Механізм простий для реалізації, але може виникнути проблема, пов'язана з затримкою пакетів всіх класів, крім одного.

- «Чесне формування черг» (Fair Queuing, або Round Robin (RR)) - реалізація механізму вибору з безлічі черг. Дозволяє ефективно розподіляти смугу пропускання між різними чергами. Одна з основних проблем даного механізму полягає в тому, що потоки з довгими пакетами можуть захоплювати значну частину доступної смуги пропускання.

- «Виважена чесне формування черг» (Weighted-Fair Queuing, WFQ) - удосконалення механізму чесного формування черг. У цій схемі кожної черги присвоюється вага, який визначає ширину використовуваної смуги пропускання.

- «Формування черг на основі класів» (Class-based Queuing) - використовується кілька черг, що відповідають різним класам трафіку. Можливе застосування різних методів обслуговування або планування черг.

- «Формування черг на основі ієрархії класів» (Hierarchical Class Based Queuing, CBQ) - трафік розділяється на класи, кожен клас, в свою чергу, може мати підкласи. Така ієрархія добре описується за допомогою дерев. Якщо підкласу потрібно більше виділеної йому смуги пропускання, то він спочатку пробує запозичити додаткову смугу у своїх дочірніх підкласів. Така схема може використовуватися для обробки різних типів трафіку на безлічі ієрархічних рівнів.

Крім того, для того щоб пристосувати різні вимоги класів до продуктивності і затримок, налаштовується також довжина черги. Однак тут необхідний компроміс. Короткі черги можуть швидко переповнювати буфер, але забезпечують найменшу затримку. Більш довгі черги для розробки більш націлених інтенсивним трафіком і забезпечують потрібну продуктивність, але затримка, відповідно, значно більше.

Фактично управління за заданими правилами, вирішуючи питання забезпечення QoS, розширює можливості сервіс-провайдера з управління мережевими ресурсами. З'являється можливість моніторингу використовуваної смуги пропускання на основі динамічно мінливих чинників, таких як час доби, пріоритет додатки, стан мережі.

Управління за заданими правилами використовується для визначення та динамічного моніторингу поведінки трафіку в межах мережевого домену. Управління за заданими правилами нагадує підхід до програмування, заснований на візуальних засобах розробки. Практично створюється незалежна від пристроїв програма, яка перевіряється на відсутність помилок і компілюється в інструкції, що виконуються мережевими пристроями.

Різні мережеві пристрої можуть мати еквівалентні набори засобів управління трафіком, але різні параметри для настройки на конкретні завдання управління. Однак при наявності різних рівнів управління зростає складність пристроїв. У деяких випадках може виявитися досить невеликого загального набору можливостей управління за заданими правилами.

Таким чином, управління за заданими правилами є засобом глобального управління в мережевому домені, що дозволяє контролювати конфігурацію мережевих пристроїв, що надають різну якість сервісу для передачі трафіку.

Управління за заданими правилами включає п'ять функцій:

- редагування правил;
- перевірку встановлених параметрів і вирішення конфліктів;
- генерацію правил;
- поширення правил;
- удосконалення правил.

Редагування використовується адміністратором мережі для визначення управління за заданими правилами і замовляються користувачем послуг.

Послуги користувачам (в основному SLA) повинні інтерпретуватися в інструкції мережових правил вручну або автоматично з використанням сервісних шаблонів системи управління. Сформовані правила повинні бути перевірені на помилки і потенційні конфлікти перед генерацією та розповсюдженням команд на мережеві пристрої.

Система управління на основі заданих правил повинна бути стійка до відмов, мати єдину консоль управління і володіти високим ступенем захисту.

Отже, найважливішою частиною сучасних мультисервісних мереж повинні стати технології надання необхідної якості сервісу (QoS), щоб на всьому протязі мережі, незалежно від її розмірів і використовуваних протоколів, забезпечити гарантовану доставку даних в рамках певних фіксованих параметрів передачі, таких як висока готовність сервісу, фіксована затримка, варіація або флуктуація затримки, висока пропускна здатність і низький рівень втрати пакетів або осередків [26].

Основою системи забезпечення якості можуть стати дві архітектури QoS - на базі інтегрованих і на базі диференційованих служб, орієнтовані відповідно на периферійне мережеве обладнання та магістральні пристрої глобальних мереж.

Мережеві рішення щодо забезпечення якості сервісу можуть сильно відрізнятися в залежності від завдань, що вирішуються сервіс-провайдерами. Аналіз мережових рішень показує, що кожне запропоноване рішення має власний комплекс переваг і недоліків, так що оптимальних рішень для всіх випадків, швидше за все, не існує.

Управління QoS є досить складним завданням для мережевого обладнання, і підтримка безлічі механізмів управління трафіком типу фільтрації, класифікації та заданих правил, безсумнівно, може дуже вплинути на якість сервісу, що надається.

2.3 Способи оцінки показників мультисервісного обслуговування в мультисервісних мережах

В основу концепції мережі зв'язку наступного покоління (NGN) покладена ідея про створення універсальної мережі, яка б дозволила переносити будь-які види трафіку, а також забезпечувати можливість надання необмеженого спектра інфокомунікаційних послуг. В рекомендації MCE-T Y.2001 - General overview of NGN технологія комутації пакетів визначена як одна з основних (фундаментальних) характеристик. Однак, технологію комутації пакетів (IP) розробили для передачі нерівномірного за часом і нечутливого до затримок потоку даних, а для передачі трафіку реального часу (чутливого до затримки і варіації затримки пакетів) планувалося використанні класичних систем комутації каналів. Простота реалізації, хороша документованість і, отже, невисока вартість обладнання визначили динамічний розвиток технології IP. Численними тематичними групами розроблялися і продовжують розроблятися рішення щодо забезпечення необхідної якості обслуговування (QoS) для передачі різнотипного трафіку (реального часу, потокового і еластичного) по єдиній мережі, це - дисципліни обслуговування PQ / CQ / WFQ / CBWFQ / LLQ / RPQ +, моделі DiffServ / IntServ-RSVP, технологія MPLS і т.д.

В рекомендації MCE-T E.800 якість обслуговування QoS визначено як сукупність характеристик послуги електрозв'язку, які мають відношення до її можливості задовольняти встановлені і передбачувані потреби користувача послуги. Оперуючи наведеним визначенням об'єктивну оцінку отримати неможливо. Проте, на основі аналізу вимог до робочих характеристик додатків можна визначити об'єктивні показники якості обслуговування. Рекомендація MCE G.1000 розділяє робочі характеристики QoS на функціональні компоненти і пов'язує їх з мережевими

характеристиками, визначеними в ряді рекомендацій МСЕ, таких як Y.1540 [4] і Y.1541.

Сеанс зв'язку складається з трьох фаз - встановлення з'єднання, передачі інформації і роз'єднання з'єднання. Говорячи про протокол IP (3-й рівень моделі OSI, не враховуючи протоколів верхніх рівнів) можна розглядати тільки одну фазу - фаза доставки пакетів IP. Рекомендація МСЕ-Т Y.1540 визначає такі параметри, що характеризують доставку IP-пакетів:

- Затримка доставки пакета IP (IP packet transfer delay, IPTD). Параметр IPTD визначається як час доставки пакета між джерелом і одержувачем для всіх пакетів - як успішно переданих, так і для пакетів, уражених помилками.

- Варіація затримки пакета IP (IP packet delay variation, IPDV). Варіація затримки пакета IP, або джиттер, проявляється в тому, що послідовні пакети прибувають до одержувача в нерегулярні моменти часу.

- Коефіцієнт втрати пакетів IP (IP packet loss ratio, IPLR). Коефіцієнт IPLR визначається як відношення сумарного числа втрачених пакетів до загальної кількості прийнятих пакетів в обраному наборі переданих і прийнятих пакетів.

- Коефіцієнт помилок пакетів IP (IP packet error ratio, IPER). Коефіцієнт IPER визначається як сумарна кількість пакетів, прийнятих з помилками, до суми успішно прийнятих пакетів і пакетів, прийнятих з помилками.

В рекомендації МСЕ-Т Y.1541 були запропоновані базові параметри якості функціонування мережі передачі даних і базові класи сервісу.

Як показує практичний досвід операторів зв'язку, навіть безумовне забезпечення визначених норм на показники якості функціонування мережі передачі даних, може призвести до неналежного якості надання ряду послуг, до яких можна віднести наступні:

- потокова передача мультимедійного контенту в форматі стандартного і високого дозволу (високі вимоги до коефіцієнта втрат і помилок);

- передача синхронного трафіку (високі вимоги до варіації затримки і коефіцієнту втрат).

Можливим рішенням, орієнтованим на регулювання відносин між учасниками, ресурси мереж яких задіяні при наданні послуг, з метою забезпечення заданих параметрів якості послуг при межоператорском взаємодії, служить угоду про рівень обслуговування (SLA), і, у виняткових випадках - угода про рівень експлуатаційної підтримки (OLA), як механізм забезпечення якості відповідно до SLA:

- SLA визначає показники якості кожної послуги і встановлює норми на них;
- OLA визначає відповідальність служб технічної експлуатації за стійкість функціонування мережі, що забезпечує, в кінцевому рахунку, якість послуг зв'язку, яке визначається в SLA [27].

Угоди повинні враховувати специфічні вимоги з боку відомства до якості надання послуг, включаючи визначення принципів і методик вимірювання показників якості послуг, а також інші важливі аспекти. Наприклад, плату за надання послуг передачі даних, санкції для оператора зв'язку за порушення або відхилення показників якості послуг, що надаються зв'язку, умови переходу до більш якісного рівня послуг або надання послуг зв'язку з різним рівнем якості в залежності від дня тижня або часу доби або інші умови.

Норми на показники функціонування мереж зв'язку використовуються при проектуванні мережі зв'язку та підлягають контролю з боку оператора зв'язку в процесі експлуатації мережі зв'язку. Таким чином, завдання впровадження та використання систем контролю параметрів QoS (контролю SLA) є актуальною.

Висновки до розділу 2

Побудована модель мультисервісної мережі зв'язку з узагальненою схемою резервування каналного ресурсу. Модель може бути застосована для оцінки характеристик спільного обслуговування довільного числа потоків повідомлень, як на рівні доступу, так і на рівні транспортного ядра. Показано, що значення показників обслуговування заявок на виділення каналного ресурсу в слабкому ступені залежать від типу функції розподілу часу утримування каналного ресурсу.

Залежність проявляється тільки через значення середнього часу утримування ресурсу на передачу повідомлення.

Основою системи забезпечення якості можуть стати дві архітектури QoS - на базі інтегрованих і на базі диференційованих служб, орієнтовані відповідно на периферійне мережеве обладнання та магістральні пристрої глобальних мереж. В свою чергу мережеві рішення щодо забезпечення якості сервісу можуть сильно відрізнятися в залежності від завдань, що вирішуються сервіс-провайдерами.

Проаналізовані способи оцінки якості обслуговування в мультисервісних мережах в рамках нашого дослідження.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ КАНАЛЬНОГО РЕСУРСУ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ МЕРЕЖ

На думку експертів і науковців, еволюція мультисервісних мереж буде супроводжуватись розвитком гібридних тарифних схем, що включають в себе наступні чотири форми оплати послуг зв'язку: 1) за одиницю часу користування послугою, наприклад, тарифікація голосового мобільного зв'язку за одну хвилину; 2) за одиницю об'єму переданої інформації, наприклад, тарифікація одного мегабайту при пересиланні файлів; 3) за факт надання послуги зв'язку, наприклад, фіксована вартість посилки SMS; 4) за доступ до послуги протягом фіксованого календарного проміжку часу незалежно від фактичного використання послуги, наприклад, помісячна абонентська плата за користування телефонним зв'язком за безлімітним тарифом.

Передбачається, що з розширенням спектра послуг велике поширення отримають тарифи, засновані на платі за факт надання послуги. Це відбувається за наступних зрозумілих причин. По-перше, така схема тарифікації проста для розуміння і не викликає додаткових питань у абонента, по-друге, вона більше відповідає ринковій вартості послуги. Поширення гібридних тарифних схем залежить від розвитку програмних засобів збору інформації та від характеру угод між різними учасниками процесу надання телекомунікаційних сервісів. Однією з найважливіших задач, що відноситься до управління мережею, є виконання дій, спрямованих на усунення блокувань. Надлишок трафіку, який ввів мережу в стан перевантаження, можна: 1) заблокувати, тобто видалити відповідні пакети з передачі (як правило, дана дія призводить до повторної передачі заблокованих пакетів, що тільки погіршує ситуацію перевантаження); 2) доставити адресату з гіршими показниками якості, наприклад, за більший час або з більшою часткою втрачених пакетів; 3) доставити адресату за велику вартість. Останнє зі згаданих дій виглядає краще, оскільки воно не зменшує дохід мережі, а також значення показників обслуговування. Вартість передачі надлишкового трафіку повинна оцінюватися виходячи з вартості його обслуговування мережею. Оцінка вартості

з'єднання необхідна для обчислення витрат, які несе споживач послуг зв'язку при використанні наданих йому ресурсів мережі. Відповідна процедура залежить від багатьох параметрів, що характеризують особливості передачі інформації, умови обслуговування і т.д. Суть обчислень полягає в оцінці тарифної угоди між абонентом і оператором з використанням реальних значень параметрів, що входять в опис тарифу. Самі параметри знаходяться в результаті вимірювань на мережі і подальшої обробки отриманих чисельних результатів за допомогою статистичних процедур. При їх реалізації використовуються моделі теорії телетрафіка, оскільки окремі характеристики вартісних схем можна оцінити тільки побічно на основі формальних припущень про властивості інформаційних потоків, що надходять [28].

Розглянемо якісні характеристики вартісних схем, що пояснюють умови і можливості їх застосування. Одним з основних показників є ступінь чутливості чисельних характеристик, одержуваних в результаті реалізації вартісного алгоритму, до можливих помилок в значеннях параметрів, які використовуються в його формулюванні. Ці помилки можуть бути внесені в процесі вимірювання відповідних вартісних параметрів або в результаті недостатнього ступеню точності у відображенні статистичних властивостей навантаження в застосовуваних при розрахунках моделях теорії телетрафіка. Зрозуміло, що точність у відображенні властивостей інформаційних потоків пов'язана з числом параметрів, що характеризують її мінливість. Чим більше число параметрів, тим точніше можна наблизити модель інформаційного потоку до реальних процесів надходження інформації, що відбувається в мережах зв'язку. Однак при цьому зростає шанс внесення похибки на стадії вимірювання значень параметрів.

Для адміністрації операційної компанії необхідно вести цінову політику так, щоб абонент, заздалегідь знаючи схему оцінки вартості свого з'єднання, міг виконати якісь дії, що дозволяють йому встановити більш економний режим заняття ресурсів мережі. В свою чергу, реалізація вартісних схем вимагає проведення обчислень і займає ресурси мережі. При обчисленні вартості необхідно в реальному часі фіксувати такі параметри з'єднання, як його початок, тривалість, а також середню та пікову інтенсивності надходження пакетів і ін. .

Легкість реалізації всіх цих процедур також необхідно враховувати при побудові вартісних схем. Їх здійснення не повинно призводити до порушення стабільності роботи мережі, а таке можливо, якщо обсяги службової інформації стають непомірно великими. В останньому випадку на мережі можуть виникати стани перевантаження, що приводять до затримок або втрати інформації. Зрозуміло, що визначальним критерієм вибору конкретної схеми є зручність реалізації та її передбачуваність. Зауважимо, що з розвитком мережі і появою нових видів обслуговування якісь положення вартісних схем, безсумнівно, будуть зазнавати зміни.

Наведемо приклади реалізації схем, що підвищують завантаження каналного ресурсу мережі. У таблиці перераховані схеми, що підвищують коефіцієнт загрузки каналного ресурсу мультисервісних мереж, про які йшла мова. Наведено оцінки досяжного ефекту і вказані методи їх знаходження. Зрозуміло, що зазначені в четвертому стовпці таблиці чисельні значення мають умовний характер і повинні уточнюватися під час розгляду конкретних ситуацій.

Зміст таблиці 3.1 показує, що є ряд можливостей, які дозволяють значно зменшити обсяг каналного ресурсу, необхідного для обслуговування заданих потоків заявок. Застосовуючи їх в сукупності, можна в десятки, а то і більше число раз зменшити потреби в ресурсі у порівнянні з його потенційним значенням при збереженні необхідних норм обслуговування користувачів. Для реалізації зазначених можливостей і подальшої оцінки їх ефективності необхідна наявність відповідного інструментарію, заснованого на результатах математичного моделювання процесів надходження і обслуговування заявок на надання телекомунікаційного ресурсу.

Таблиця 3.1 Схеми, що здатні підвищити коефіцієнт завантаження каналного ресурсу мультисервісних мереж

Ефект, що використовується	Шкала часу	Метод оцінки ефекту	Оцінка зменшення потреби в ресурсі
Статистичне мультиплексування процесу передачі моносервісних повідомлень	Моменти надходження заявок	Моделі та методи теорії телетрафіку	У 8-9 разів у порівнянні з потенційним рішенням
Статистичне мультиплексування процесу передачі пакетизованої інформації	Моменти надходження пакетів	Концепція ефективної інтенсивності інформаційного потоку	У 1,5-2,5 рази у порівнянні з рішенням, отриманим на базі комутації каналів
Статистичне мультиплексування процесу передачі мультисервісних повідомлень	Моменти надходження заявок	Моделі та методи телетрафіку мультисервісних мереж	На 10%-30% у порівнянні з сумарним рішенням, отриманим окремо для кожної мережі
Динамічний розподіл ресурсу між заявкою, що поступила, і заявками, що знаходяться на обслуговуванні	Моменти надходження заявок	Моделі та методи телетрафіку мультисервісних мереж	На 15%-25% у порівнянні з рішенням, в якому дана схема не застосована
Пріоритетне обслуговування повідомлень реального часу та використання буфера	Моменти надходження заявок	Моделі та методи телетрафіку мультисервісних мереж	На 15%-25% у порівнянні з рішенням, в якому дана схема не застосована
Гнучкі тарифні схеми	Моменти надходження заявок	Методи економіки і телетрафіку мультисервісних мереж	Змінюється у великому діапазоні і залежить від конкретної ситуації

3.1 Розподіл каналного ресурсу при обслуговуванні мультисервісного трафіку

На етапі проектування мультисервісних мереж необхідно виконати обґрунтований вибір основних параметрів якості обслуговування (Quality of Service, QoS) користувачів послуг. Дані параметри мають нормовані значення, які повинні використовуватися в якості обмежень при вирішенні задачі по розрахунку каналного ресурсу проектованої мультисервісної мережі [29].

У мережах зв'язку з комутацією пакетів використовуються дві групи параметрів QoS. Перша група параметрів характеризує якість передачі інформації. Нормовані значення, а також методика вимірювання і розрахунку даних параметрів наведені в рекомендаціях МСЕ різних років, про що було вказано раніше.

Друга група параметрів QoS визначає якість обслуговування повідомлень. Нормовані значення даних параметрів використовуються при розрахунку пропускної здатності каналів зв'язку мультисервісної мережі.

При формалізованому розрахунку топології мультисервісної мережі основним структурним параметром, що задає пропускну здатність цифрових ліній, є швидкість передачі, виражена в одиницях каналного ресурсу. Виходячи з відомих теоретичних результатів і практичних рекомендацій, для визначення швидкості передачі можна використовувати наступну логіку. Нехай в аналізованій моделі мережі є J цифрових ліній. Занумеруємо ці лінії довільним чином. Припустимо, що лінія з номером j має фіксовану швидкість передачі S_j біт/с. Припустимо також, що на мережі обслуговується потоків повідомлень, що йдуть від вузла-джерела до вузла-одержувача за фіксованим для даного потоку шляхом, що складається з послідовності цифрових каналів. Будемо вважати, що для обслуговування повідомлення k -го потоку потрібно каналний ресурс D_k біт/с в кожній з цифрових ліній, що складають маршрут слідування повідомлень k -го потоку. Передбачається, якщо не обумовлено окремо, що значення D_k не змінюється за час обслуговування, не залежить від порядкового номера переданого повідомлення і оцінюється або на основі пікової величини інтенсивності надходження пакетів, переданих по аналізованому з'єднанню, або з використанням ефективної інтенсивності.

Назвемо одиницею каналного ресурсу найбільший спільний дільник (НОД) цілочисельних значень швидкостей S_1, \dots, S_J усіх цифрових ліній, наявних в мережі, і вимог до швидкостей обслуговування D_1, \dots, D_n кожного з n наявних в мережі потоків повідомлень. Позначимо одну одиницю каналного ресурсу через θ . Таким чином,

$$\theta = \text{НОД}(S_1, \dots, S_J, D_1, \dots, D_n). \quad (3.1)$$

У результаті, цілочисельне уявлення швидкості j -ої цифрової лінії має вигляд $V_j = S_j / \theta$ одиниць каналного ресурсу, а цілочисельна вимога до швидкості обслуговування для повідомлень k -го потоку - $b_k = D_k / \theta$ одиниць каналного ресурсу.

У практичних завданнях вибір одиниці каналного ресурсу залежить від типу мережевої ділянки, на якій проводиться розрахунок. Наприклад, якщо аналізується процес формування абонентського трафіку, то, як правило, в якості одиниці каналного ресурсу зручно використовувати швидкість передачі основного цифрового каналу 64 кбіт/с.

На магістральній ділянці мережі в залежності від ступеня концентрації трафіку в якості одиниці каналного ресурсу може бути обрана швидкість потоку E1 (2,048 Мбіт/с) або швидкість, що задається синхронним транспортним модулем STM-1 (155 Мбіт/с) синхронної цифрової ієрархії SDH.

Для оцінки параметрів якості обслуговування інформаційних потоків, переданих по мережах з комутацією пакетів з використанням віртуальних з'єднань, можна використовувати моделі, що застосовуються в класичній теорії телетрафіка для оцінки характеристик мереж комутації каналів з явними втратами в результаті блокування викликів. Аналогом каналу в мережах з комутацією пакетів виступає одиниця каналного ресурсу. Відповідно, обсяг каналного ресурсу, виражений в одиницях каналного ресурсу, будемо називати просто каналним ресурсом [30].

У досліджуваній моделі мультисервісної лінії є n потоків заявок на виділення каналного ресурсу. Надходження заявок k -го потоку приймемо відповідно до закону Пуассона з інтенсивністю λ_k , де $k = 1, 2, \dots, n$. При використанні даної моделі передбачається, що потік заявок формується від значно більших груп користувачів.

Позначимо через v - швидкість передачі мультисервісної лінії, виражену в одиницях каналного ресурсу, необхідного для обслуговування заявок. Нехай b_k - число одиниць каналного ресурсу лінії, яке необхідне для обслуговування однієї заявки k -го потоку. Передбачається, що час утримування каналного ресурсу на обслуговування однієї заявки k -го потоку має експоненціальний розподіл з параметром μ_k , $k = 1, 2, \dots, n$. Наведені далі розрахункові алгоритми справедливі і при довільному розподілі тривалості обслуговування заявок.

При прийнятих припущеннях схема функціонування базової моделі мультисервісної лінії показана на рис. 1. Часто оцінка пропускну здатності каналів зв'язку мультисервісних мереж відбувається за аналогією з принципами, застосовуваними в мережах з комутацією каналів. В основі одного з таких принципів лежить твердження про підвищення ефективності використання каналного ресурсу лінії при об'єднанні потоків повідомлень. Дане твердження справедливе, якщо мова йде про об'єднання потоків заявок з однаковими вимогами до обсягу каналного ресурсу, необхідного для обслуговування однієї заявки.

Слід зазначити, що потоки повідомлень, породжені новими мультисервісними додатками, за властивостями значно відрізняються від потоків з однаковим типом трафіку. Це означає, що розвинені в класичній теорії телетрафіка методики оцінки каналного ресурсу цифрових ліній, що забезпечує заданий рівень якості обслуговування, слід застосовувати з низкою застережень.

Розглянемо модель ланки мультисервісної мережі зв'язку, в якій аналізується процес надходження і обслуговування n потоків заявок на виділення каналного ресурсу, необхідного для обслуговування повідомлень різних інфокомунікаційних послуг (мовні повідомлення, відео-конференції тощо). Будемо припускати, що надходження заявок k -го потоку підпорядковується закону Пуассона з інтенсивністю α_k , де $k = 1, 2, \dots, n$. Нехай v - швидкість передачі цифрової лінії, виражена в одиницях каналного ресурсу, необхідного для обслуговування заявок, b_k - число одиниць каналного ресурсу цифрової лінії, необхідного для обслуговування одного повідомлення k -го інформаційного потоку. Час утримування каналного ресурсу на обслуговування однієї заявки k -го потоку має експоненціальний розподіл з параметром, рівним одиниці [31].

Нехай $p(i_1, i_2, \dots, i_n)$ - стаціонарна ймовірність того, що на обслуговуванні перебуває i_k заявок k -го потоку, $k = 1, 2, \dots, n$. Якість обслуговування заявок k -го потоку будемо характеризувати часткою втрачених заявок π_k і середньою величиною каналного ресурсу цифрової лінії m_k , зайнятого обслуговуванням повідомлень k -го потоку. Нехай S - простір станів досліджуваної моделі. Воно складається з векторів (i_1, i_2, \dots, i_n) , що задовольняють умові

$$\sum_{k=1}^n i_k b_k \leq v. \quad (3.2)$$

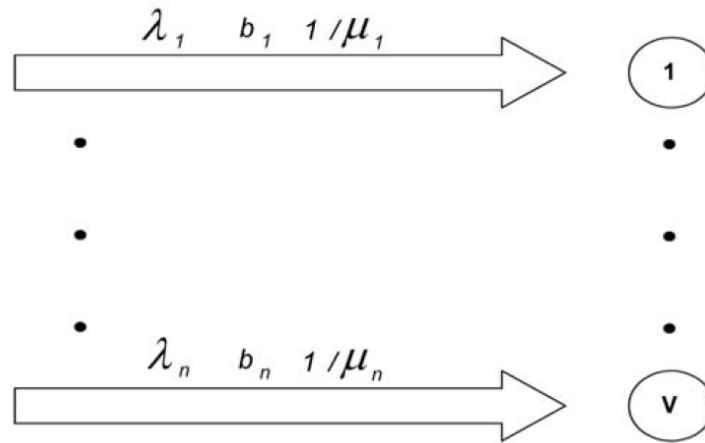


Рисунок 3.1 Схема функціонування базової моделі мультисервісної лінії зв'язку

Частка втрачених заявок k -го потоку π_k в силу пуассонівського характеру їх надходження знаходиться як частка часу перебування цифрової лінії в станах, коли немає достатнього ресурсу для прийому надійшовшої заявки до обслуговування. Позначимо безліч відповідних станів через B_k . Множина B_k включає в себе стани $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S$, що задовольняють умові:

$$\sum_{k=1}^n i_k b_k > v - b_k. \quad (3.3)$$

Середня величина каналного ресурсу цифрової лінії, зайнятого обслуговуванням заявок k -го потоку, m_k знаходиться з виразу:

$$m_k = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} p(i_1, i_2, \dots, i_n) i_k b_k. \quad (3.4)$$

Ефективний алгоритм оцінки введених характеристик заснований на використанні значень ймовірностей перебування моделі в безлічі станів $S_i \in S$, куди входять стани $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S$, що задовольняють умові:

$$\sum_{k=1}^n i_k b_k = i.$$

$$p(i) = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S_i} p(i_1, i_2, \dots, i_n).$$
(3.5)

Тоді введені показники можуть бути знайдені зі співвідношень:

$$\pi_k = \sum_{i=v-b_k+1}^v p(i), m_k = a_k b_k (1 - \pi_k),$$
(3.6)

де значення $p(i)$ визначається з рекуррентної залежності:

$$p(i) = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^n a_k b_k p(i - b_k),$$

$$i = 1, 2, \dots, v, \quad p(0) = 1.$$
(3.7)

Скориставшись побудованою моделлю, розглянемо чисельний приклад, який ілюструє поведінку основних показників обслуговування заявок з різними вимогами до обсягу каналного ресурсу.

Нехай $v=120$, $n=2$, $\alpha_k = vr/nb_k$, $k=1,2$ і значення r являє собою інтенсивність вхідного трафіку на одну каналну одиницю, виражену в ерлангах. На рисунку нижче показані значення частки втрачених заявок, розраховані при спільному і роздільному обслуговуванні заявок і збільшенні значення r .

Спільне обслуговування - загальний каналний ресурс $v=120$: крива 1 - частка втрачених заявок 1-го потоку при $b_1 = 1$; крива 2 - частка втрачених заявок 2-го потоку при $b_2 = 30$.

Роздільне обслуговування: крива 3 - доля втрачених заявок 1-го потоку $b_1 = 1$, при обслуговуванні заявок відповідного потоку на лінії з каналним ресурсом $v=60$; крива 4 - частка втрачених заявок 2-го потоку при $b_2 = 30$ при обслуговуванні заявок відповідного потоку на лінії з каналним ресурсом $v=60$.

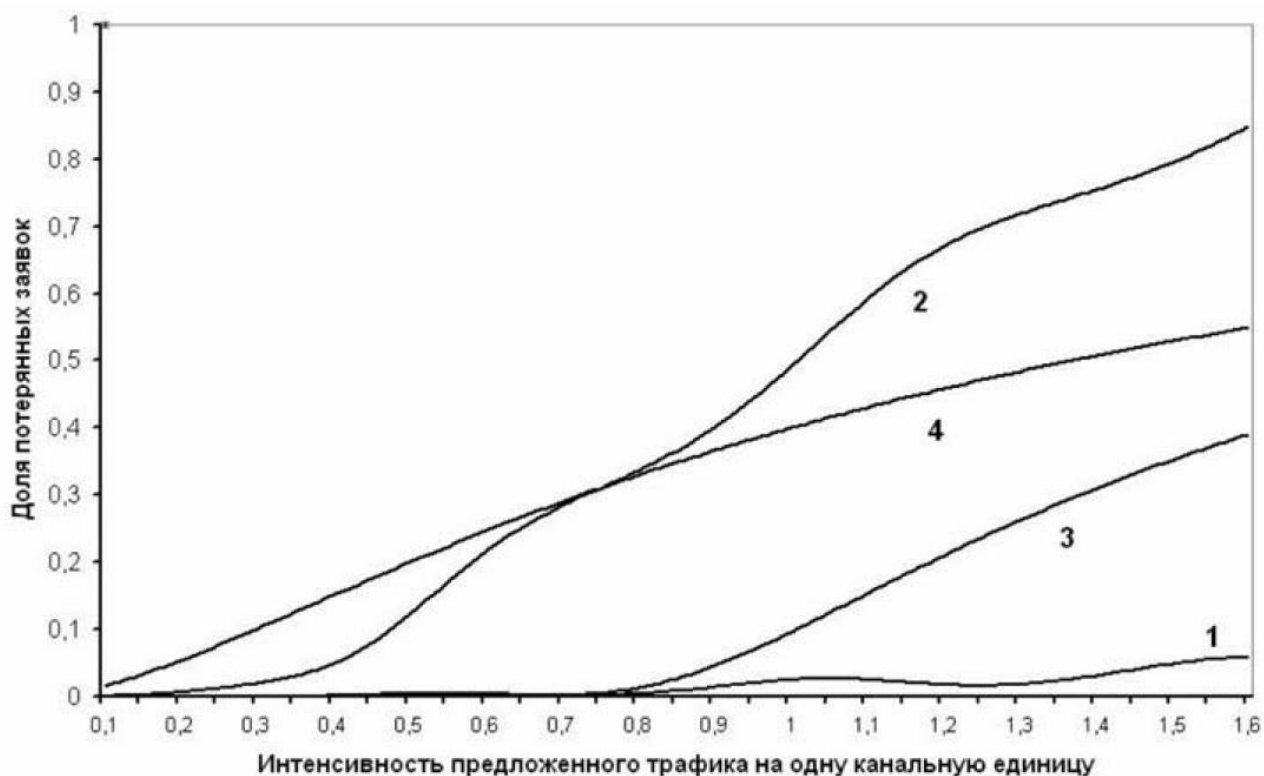


Рисунок 3.2 Значення частки втрачених заявок на мультисервісної лінії при спільному (криві 1 і 2) і роздільному (криві 3 і 4) їх обслуговуванні; $b_1=1$, $b_2=30$.

На рис. 3.3 в цих же умовах показані значення коефіцієнта використання однієї каналної одиниці. Крива 1 розрахована для випадку спільного обслуговування заявок, крива 2 - при роздільному обслуговуванні.

З розрахованих даних випливає, що при спільному обслуговуванні заявок декількох потоків, що мають істотну різницю в обсязі каналного ресурсу, необхідного для обслуговування однієї заявки, спостерігається неконтрольований оператором перерозподіл ємності каналного ресурсу.

Зменшення ймовірності втрат для заявок першого потоку (див. рис. 3.2, крива 1) пояснюється тим, що з ростом загальної інтенсивності вхідного трафіку повідомлення першого потоку, займаючи каналний ресурс, не допускають до нього повідомлення другого потоку, оскільки тим для обслуговування одночасно потрібен більший ресурс лінії.

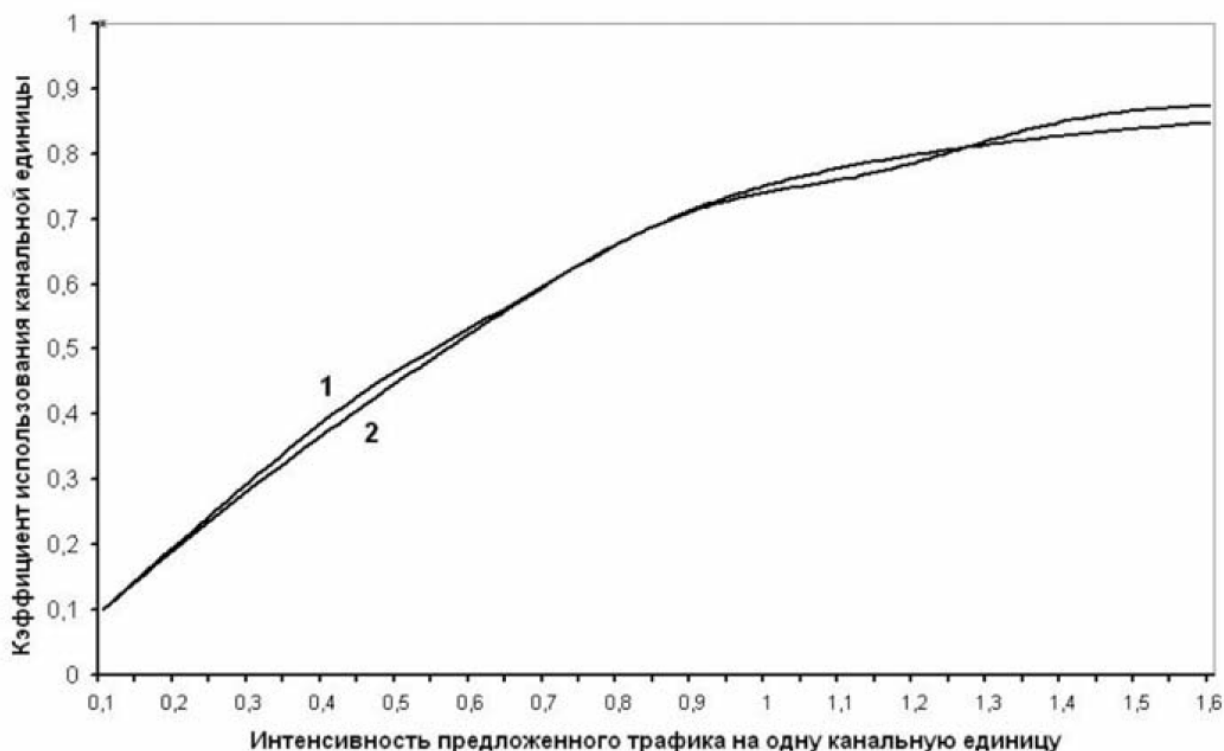


Рисунок 3.3 Значення коефіцієнту використання однієї каналної одиниці при зумісному (крива 1) та роздільному (крива 2) обслуговуванні заявок; $b_1=1$, $b_2=30$.

В результаті повідомлення першого потоку отримують додаткові можливості для використання каналного ресурсу цифровий лінії. З тих же причин коефіцієнт використання каналної одиниці при спільному обслуговуванні заявок виявляється менше, ніж при роздільному обслуговуванні (див. Рис. 3).

Для вирішення виникаючих проблем необхідно використовувати схеми контролю розподілу каналного ресурсу, що залежать від типу обслуговуваних заявок і ступеня завантаження цифрової лінії. Можливе використання трьох моделей: резервування, пріоритетного обслуговування і спільного використання каналного ресурсу відповідно до характеристик обслугованого трафіку [32].

Застосування тієї чи іншої схеми розподілу каналного ресурсу залежить від різних чинників, в тому числі і вартісних, і вимагає окремого дослідження.

3.2 Особливості формування сигнально-кодових конструкцій на основі технології IEEE 802.11

Серед сучасних тенденцій розвитку інфокомунікацій переважають такі напрями як 5G, когнітивні мережі, біг-дейта, оптичні мережі, грін-комунікації, телекомунікаційні системи терагерцового діапазону, розподільчі транспортні мережі мобільного зв'язку тощо. Побудова значної частки пристроїв безпроводового зв'язку в межах цих тенденцій здійснюється на основі концепції SDR - Software-defined radio. Відомими на сьогоднішній день прикладами реалізації концепції SDR є пристрої для мереж GSM, UMTS, Wi-Fi, WiMAX тощо [18].

Важливо відзначити, що області застосування технології Wi-Fi надзвичайно активно розвиваються, причому пристрої мереж Wi-Fi здатні працювати як в режимі точки доступу для покриття певної зони, так і в режимі ретрансляції сигналів в mesh-мережі. Це дозволяє створювати повноцінні інфокомунікаційні мережі.

Задачею будь-якої телекомунікаційної системи є досягнення в рамках виділених ресурсів каналу зв'язку високої швидкості та необхідної достовірності передачі інформації. Одним з відомих засобів реалізації цього завдання є звернення до багатопозиційних видів модуляції та завадостійкого кодування. Комбінацію певного виду багатопозиційної модуляції та завадостійкого кодування із визначеними параметрами завадостійкості називають сигнально-ковою конструкцією (СКК).

Якщо пристрій зв'язку обирає відповідну структуру СКК автоматично за відповідною програмою та алгоритмом, слід вважати такий пристрій відповідним концепції SDR. Опису доцільних для цього критеріїв та алгоритмів і реалізації концепції створення програмно-визначених радіосистем терагерцового діапазону на основі технології Wi-Fi присвячена дана стаття [20].

Сучасні телекомунікаційні системи використовують багато видів сигнальних конструкцій, і при цьому вибір певної сигнальної конструкції має вибиратися заздалегідь для використання, або ж на основі алгоритму для динамічного вибору виду сигнальної конструкції на основі певних критеріїв.

Актуальною є задача вибору оптимальних СКК для досягнення максимальної швидкості передачі із задоволенням необхідної достовірності передачі у заданому каналі та виділених ресурсах каналу зв'язку. В той же час, актуальним є порівняння оптимальних СКК із рекомендованими в стандартах Wi-Fi та надання оцінки щодо доречності вибору тієї чи іншої СКК.

Як показав огляд доступних Wi-Fi пристроїв на телекомунікаційному ринку, виробники не розголошують алгоритми і критерії для вибору виду сигнальної конструкції, що реалізовані в пристроях, і тому важко зазначити, наскільки раціональні в цих пристроях способи вибору сигнальної конструкції та наскільки вони ефективні.

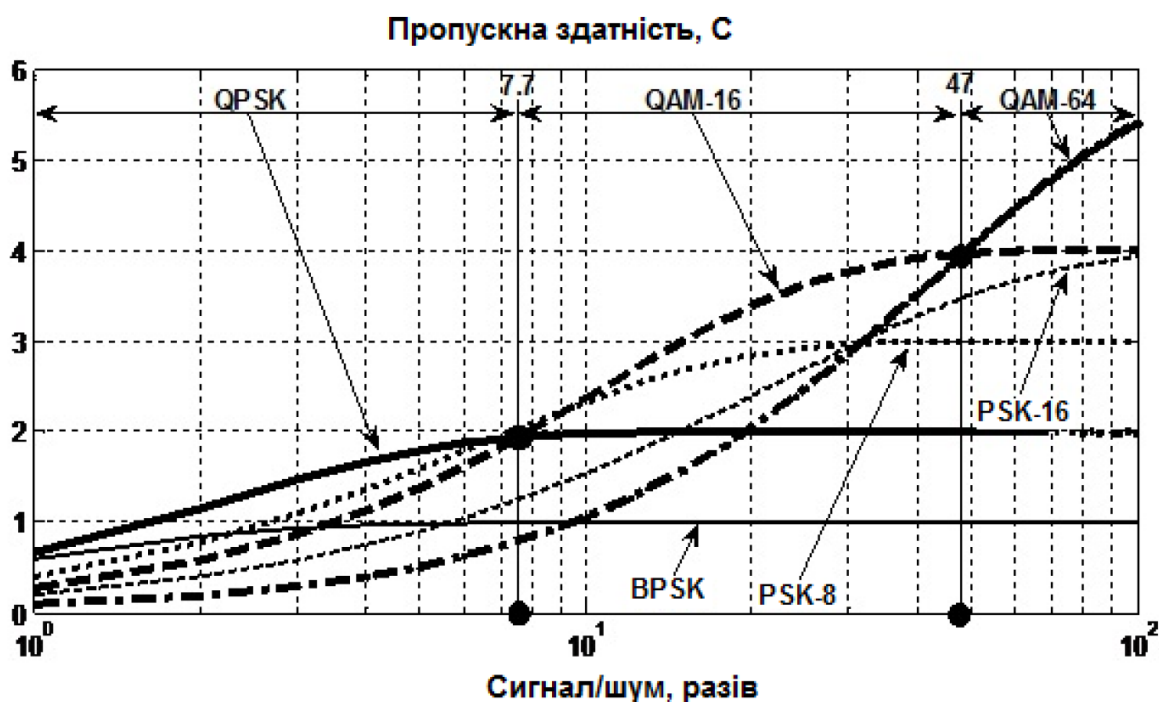


Рисунок 3.4 Залежність пропускної здатності каналу зв'язку від відношення рівня сигналу до рівня шуму для різних видів багатопозиційної модуляції

Згідно з рис. 3.4, виходячи з набору модуляцій BPSK, QPSK, PSK-8, PSK-16, QAM-16, QAM-64, доцільно використовувати наступні види модуляцій за критерієм максимальної пропускної здатності в залежності від відношення рівня енергії сигналу до спектральної потужності шуму в точці прийому (табл. 3.2):

Таблиця 3.2 Граничні значення відношення сигнал/шум для вибраних оптимальних видів багатопозиційної модуляції

	Відношення сигнал/шум (h^2), разів	Оптимальний вид багатопозиційної модуляції за критерієм максимальної пропускної здатності
1	$0 < h^2 < 7,7$	QPSK
2	$7,7 < h^2 < 47$	QAM-16
3	$47 < h^2 < 100$	QAM-64

Для оцінки ефективності вибору СКК пропонується використовувати шкалу ефективності використання ресурсів каналу зв'язку, де показниками є: енергетична β , частотна γ та інформаційна η (рис.3.5) ефективність. Дослідження показують, що використання СКК дає значний вииграш у порівнянні із випадком при використанні модуляції низького рівня без завадостійкого кодування. Також рекомендується використання способу розподілу частотного ресурсу OFDM, завдяки якому ефективніше вдається розподіляти доступ до ресурсів каналу зв'язку, а також працювати в умовах багатопроменевого розповсюдження.

Як показує огляд продукції провідних виробників телекомунікаційного обладнання Wi-Fi, наприклад, Mikrotik чи Ubiquiti, в документації на обладнання не описуються методи адаптивного перемикання видів модуляції та параметрів завадостійкого кодування, а також умови для здійснення такого перемикання видів СКК. Проте існують рекомендації в стандартах 802.11 a/b/g/n/ac щодо рівнів сигналу, за яких рекомендується перемикати вид СКК на основі значень потужності сигналу на вході приймача (табл. 3.3).

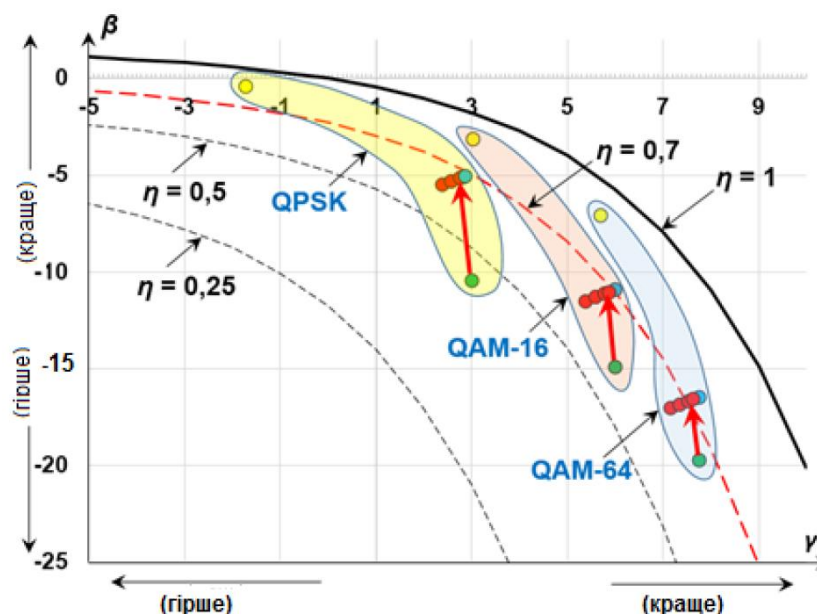


Рисунок 3.5 Шкала ефективності використання ресурсів каналу зв'язку

Таблиця 3.3 Швидкості передачі даних згідно стандарту 802.11n (також відомі як схеми модуляції і кодування, або індекси сигнально-кодових конструкцій MCS), і відповідні рівні чутливості приймача

Індекс сиг- нально-ко- дової конс- трукції MCS	Потоки даних	Модуляція / швидкість кодування	Швидкість передачі даних (Мбіт/с)				Чутливість приймача, дБм	
			Захисний інтервал 800		Захисний інтервал 400			
			нс		нс		20 МГц	40 МГц
			20 МГц	40 МГц	20 МГц	40 МГц	20 МГц	40 МГц
0	1	BPSK/1:2	6,5	13,5	7,2	15,0	-82	-79
1	1	QPSK/1:2	13,0	27,0	14,4	30,0	-79	-76
2	1	QPSK/3:4	19,5	40,5	21,7	45,0	-77	-74
3	1	16-QAM/1:2	26,0	54,0	28,9	60,0	-74	-71
4	1	16-QAM/3:4	39,0	81,0	43,3	90,0	-70	-67
5	1	64-QAM/2:3	52,0	108,0	57,8	120,0	-66	-63
6	1	64-QAM/3:4	58,5	121,5	65,0	135,0	-65	-62
7	1	64-QAM/5:6	65,0	135,0	72,2	150,0	-64	-61
8	2	BPSK/1:2	13,0	27,0	14,4	30,0	-82	-79
9	2	QPSK/1:2	26,0	54,0	28,9	60,0	-79	-76
10	2	QPSK/3:4	39,0	81,0	43,3	90,0	-77	-74
11	2	16-QAM/1:2	52,0	108,0	57,8	120,0	-74	-71
12	2	16-QAM/3:4	78,0	162,0	86,7	180,0	-70	-67
13	2	64-QAM / 2:3	104,0	216,0	115,6	240,0	-66	-63
14	2	64-QAM/3:4	117,0	243,0	130,0	270,0	-65	-62
15	2	64-QAM/5:6	130,0	270,0	144,4	300,0	-64	-61
16	3	BPSK/1:2	19,5	40,5	21,7	45,0	-82	-79
17	3	QPSK/1:2	39,0	81,0	43,3	90,0	-79	-76
18	3	QPSK/3:4	58,5	121,5	65,0	135,0	-77	-74
19	3	16-QAM/1:2	78,0	162,0	86,7	180,0	-74	-71
20	3	16-QAM/3:4	117,0	243,0	130,7	270,0	-70	-67
21	3	64-QAM / 2:3	156,0	324,0	173,3	360,0	-66	-63
22	3	64-QAM / 3:4	175,5	364,5	195,0	405,0	-65	-62
23	3	64-QAM / 5:6	195,0	405,0	216,7	450,0	-64	-61

В той же час, критерій чутливості на вході приймача не завжди є доцільним, оскільки він не враховує значення шуму в каналі і, відповідно, відношення рівня сигналу до рівня шуму. Тому при використанні лише показника рівня сигналу на вході приймача можлива ситуація, коли відношення сигналу до шуму буде малим при значному рівні шуму, що спричинить неможливість передачі при заданому виді СКК. Вибрати більш підходящий вид СКК вдається завдяки можливостям моніторингу якості каналу прийомо-мопередавачем з SDR, що в результаті впливає на вибір прийнятного СКК.

Отже, задача вибору оптимальної СКК є надзвичайно важливою, оскільки вона визначає інформаційну швидкість передачі даних із виконанням вимог щодо достовірності передачі, а також ефективність використання виділених ресурсів каналу зв'язку. У свою чергу, якщо виробники обладнання і не описують методи та умови формування СКК, то роблять посилання на стандарти IEEE 802.11, де наведено параметри СКК.

3.3 Дослідження технічної ефективності радіоканалів телекомунікаційних мереж на основі технології Wi-Fi

Як відомо, однією із найбільш важливих характеристик телекомунікаційних систем та мереж є ефективність - їх властивість виконувати поставлену задачу в заданих умовах використання з необхідною якістю [24].

Ефективність є узагальненим показником оптимального функціонування телекомунікаційної системи чи мережі та залежить від характеристик якості. До локальних показників ефективності належать: прагматична (ступінь задоволення системою чи мережею свого призначення), технічна (технічна досконалість), технологічна (простота й технологічність розроблення та створення), експлуатаційна (зручність використання й обслуговування) та економічна (доцільність здійснених затрат для створення й функціонування системи чи мережі) ефективність.

Одним із найважливіших локальних показників ефективності є технічна ефективність. Згідно з більшістю статей з цієї теми, технічна ефективність

телекомунікаційних систем та мереж залежить від застосованих методів формування й оброблення сигналів: методів модуляції, коригуючого або решіткового кодування, демодуляції, коригуючого або решіткового декодування, ущільнення/розділення каналів, методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком.

Дослідженню ефективності телекомунікаційних систем та мереж присвячено значну кількість публікацій. Проте актуальною задачею залишається дослідження технічної ефективності таких систем та мереж, побудованих на основі сучасних технологій передачі даних. Цікавим напрямком є дослідження ефективності телекомунікаційних мереж на основі широко вживаної технології Wi-Fi. Метою цієї роботи є дослідження технічної ефективності радіоканалів телекомунікаційних мереж на основі технології Wi-Fi.

Технічна ефективність телекомунікаційних систем та мереж залежить від застосованих методів формування й оброблення сигналів: методів модуляції, коригуючого або решіткового кодування, демодуляції, коригуючого або решіткового декодування, ущільнення/розділення каналів, методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком. Проте, як видно із проведених досліджень, немає єдиної комплексної характеристики технічної ефективності, що враховує вплив усіх згаданих методів [33].

Важливість вироблення комплексної характеристики для оцінювання технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж, побудованих із використанням різноманітних методів формування й оброблення сигналів, полягає в наступному. Окремі відомі характеристики дозволяють оцінити вплив окремих використаних методів на ефективність системи або мережі, але не можуть показати, який із методів найбільш істотно впливає на ефективність системи або мережі в цілому. Окремі характеристики ефективності доцільно застосовувати для вибору необхідного методу модуляції, кодування, ущільнення/розділення каналів і протоколу передачі даних при початковому проектуванні системи або мережі, яка буде працювати в стаціонарному режимі. Але при розробленні системи або мережі, що працює в нестаціонарному режимі, потрібно враховувати вплив застосування різних методів на її ефективність протягом сеансу зв'язку. Окрім цього, у ряді

випадків виникає необхідність порівняти ефективність різних систем чи мереж, що з використанням декількох окремих характеристик вельми проблематично.

Тому для вирішення перерахованих вище задач існує потреба в удосконаленні теоретичних основ визначення технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж, побудованих із використанням різноманітних методів формування й оброблення сигналів, для вироблення комплексної характеристики. Така характеристика повинна враховувати вплив застосованих у системі чи мережі методів модуляції, коригуючого або решіткового кодування, демодуляції, коригуючого або решіткового декодування, ущільнення/розділення каналів, методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком.

Для комплексного оцінювання технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж передавання даних, побудованих із використанням різноманітних методів формування й оброблення сигналів, доцільно застосовувати запропоновану автором характеристику - коефіцієнт використання телекомунікаційної системи (мережі чи каналу електрозв'язку) за застосованими методами формування й оброблення сигналів (сигнальну ефективність) η_c , що враховує інформаційну ефективність $\eta_{СКК}$ застосованих при формуванні сигнально-кодової конструкції методів модуляції та кодування, інформаційну ефективність методу розділення каналів η_p , ефективність методу передавання даних $\eta_{МП}$ і дорівнює:

$$\eta_c = \eta_{СКК} \eta_p \eta_{МП}. \quad (3.8)$$

У випадку передавання даних через багатоканальну телекомунікаційну систему чи мережу, що характеризується змінною в часі пропускною здатністю $C_c(t)$ протягом тривалості $t_{зв}$ сеансу зв'язку (загального часу $T_{інф}$ передавання певного обсягу інформації), використовують декілька сигнально-кодкових конструкцій, що забезпечують зміну швидкості $v_{6i}(t)$ передавання даних у часі в i -х каналах, тоді сигнальну ефективність запропоновано обчислювати так:

$$\eta_c = \eta_{МП} \left(\sum_{i=1}^{N_K} \left(\int_{t_{3\delta 1}}^{t_{3\delta 2}} v_{\delta_i}(t) dt \right) \right) / \left(\int_{t_{3\delta 1}}^{t_{3\delta 2}} C_c(t) dt \right). \quad (3.9)$$

Нехай ефективність методу передавання даних у i -му каналі:

$$\eta_{МП_i} = \frac{1}{t_{3\delta i}} \sum_{j=1}^{N_{ti}} (t_{3\delta 2j} - t_{3\delta 1j}), \quad (3.10)$$

де $t_{3\delta i}$ - час сеансу зв'язку в i -му каналі; $t_{3\delta 1}$, $t_{3\delta 2}$ - моменти часу початку та кінця N_{ti} проміжків часу, у яких передають дані.

Тоді сигнальна ефективність може бути обчислена за допомогою наступного співвідношення:

$$\eta_c = \left(\sum_{i=1}^{N_K} \left(\frac{1}{t_{3\delta i}} \sum_{j=1}^{N_{ti}} \left(\int_{t_{3\delta 1j}}^{t_{3\delta 2j}} v_{\delta_i}(t) dt \right) \right) \right) / \left(\frac{1}{t_{3\delta}} \int_{t_{3\delta 1}}^{t_{3\delta 2}} C_c(t) dt \right). \quad (3.11)$$

Запропоновану сигнальну ефективність доцільно застосувати при дослідженні технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж із обмеженими смугою пропускання та потужністю сигналу при передаванні даних в умовах завад для виявлення таких методів формування й оброблення сигналів (методів модуляції, коригуючого або решіткового кодування, демодуляції, коригуючого або решіткового декодування, ущільнення/розділення каналів, методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком), які забезпечують найвищу ефективність телекомунікаційних систем та мереж.

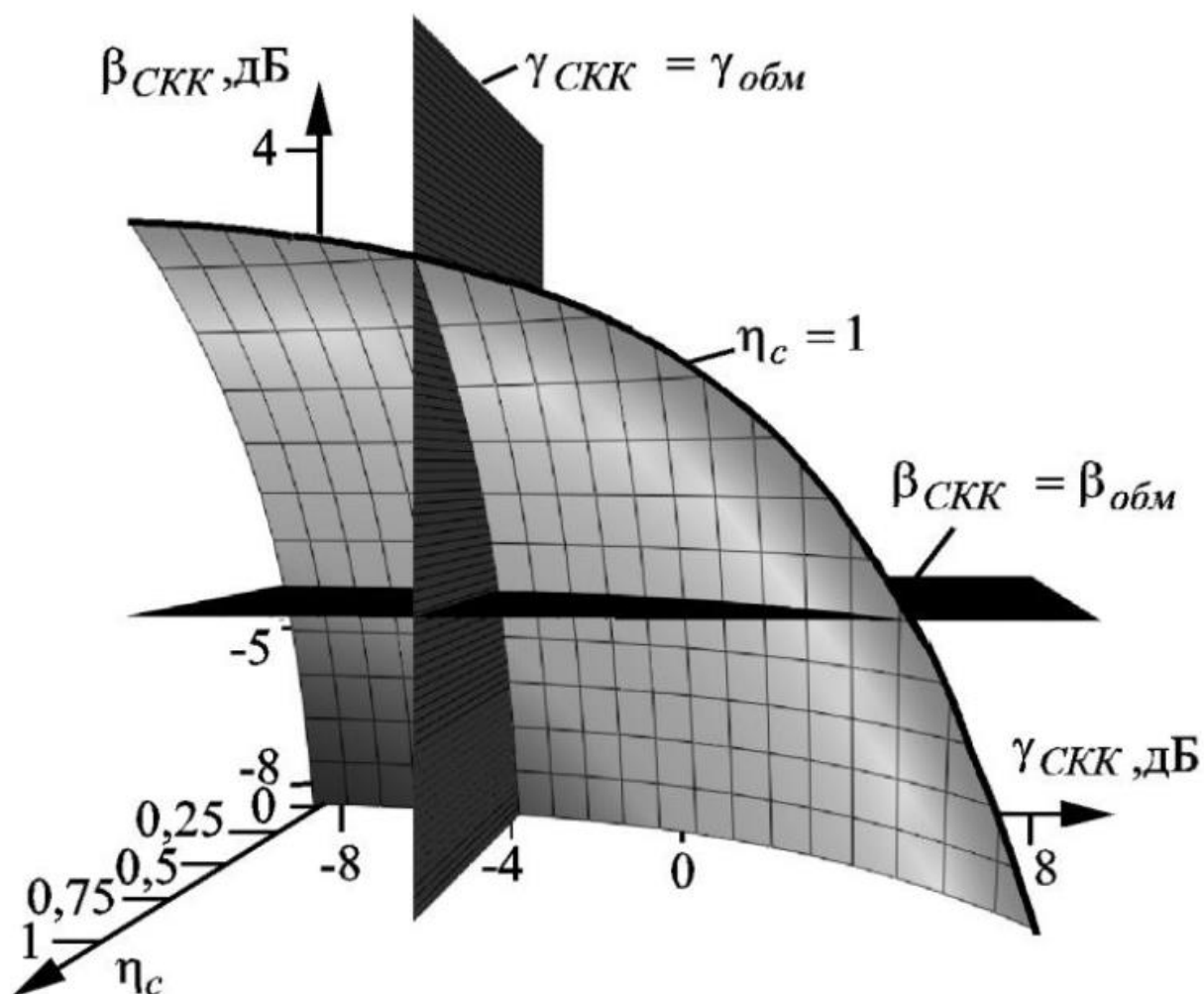


Рисунок 3.6 Залежність сигнальної ефективності η_c телекомунікаційної системи чи мережі від частотної $\gamma_{скк}$ та енергетичної $\beta_{скк}$ ефективності сигнально-кодової конструкції

У простішому випадку, коли телекомунікаційна система є одноканальною (ефективність методу розділення каналів $\eta = 1$) і характеризується незмінною в часі пропускнуою здатністю, залежність сигнальної ефективності η_c від частотної $\gamma_{скк}$ та енергетичної $\beta_{скк}$ ефективності сигнально-кодової конструкції при ефективності методу передавання даних $\eta_{мп} = 1$ може бути представлена графічно у вигляді поверхні, зображеної на рисунку 1. Як видно з рисунка, сигнальна ефективність може досягнути максимального значення $\eta_c = 1$ на границі Шеннона лише при

певних співвідношеннях частотної та енергетичної ефективності сигнально-кодової конструкції. Проте на практиці телекомунікаційні системи чи мережі працюють в умовах обмеженої потужності сигналу P_c при дії шуму з потужністю $P_{ш}$ та обмеженої смуги пропускання ΔF системи чи мережі при необхідності забезпечувати задану швидкість передавання даних v_b . Згідно вищезазначених співвідношень такі обмеження однозначно задають обмежені значення енергетичної $\beta_{обм}$ та частотної $\gamma_{обм}$ ефективності.

У такому разі діапазон можливих значень сигнальної ефективності системи чи мережі відповідає сукупності точок на поверхні, заданій співвідношенням, обмеженим площинами, заданими у вигляді $\beta_{скк} = \beta_{обм}$, $\gamma_{скк} = \gamma_{обм}$ і границею Шеннона, на якій $\eta_c = 1$. Значення сигнальної ефективності телекомунікаційної системи чи мережі при застосуванні певних обраних методів формування й оброблення сигналів може бути відображене у вигляді точок на цій поверхні, які для сучасних відомих методів є віддаленими від границі Шеннона, тобто сигнальна ефективність систем при їхньому застосуванні є меншою порівняно з максимально можливою. Тому реальна телекомунікаційна система чи мережа буде найбільш ефективною, якщо застосовані при її побудові методи формування й оброблення сигналів дозволять наблизитись до теоретичної максимально можливої ефективності системи чи мережі з урахуванням обмежуючих факторів [34].

Таким чином, використання запропонованої комплексної характеристики для оцінювання технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж - сигнальної ефективності - дає змогу:

- оцінити ступінь впливу кожного із застосованих методів формування й оброблення сигналів на ефективність системи або мережі в цілому;
- урахувати зміну ефективності системи чи мережі в часі при змінних у часі параметрах системи або мережі;
- порівняти різні системи чи мережі при передаванні даних на основі єдиного критерію;
- здійснювати оптимізацію методів формування й оброблення сигналів для підвищення технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж.

Таким чином, з використанням вищевказаних співвідношень досліджено енергетичну, частотну, інформаційну та сигнальну ефективність радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi згідно стандарту IEEE 802.11n, у якому при передаванні даних застосовують одну із восьми сигнально-кодових конструкцій MCS0 - MCS7, передбачених для використання в цьому стандарті. Дослідження здійснене при передаванні даних у смузі частот 20 МГц з імовірністю бітової помилки $P_b = 7,37 \cdot 10^{-3}$ (що відповідає ймовірності пакетної помилки $P_{пак} = 0,1$ при передаванні пакетів Ethernet стандартної довжини) та $P_b = 1 \cdot 10^{-5}$. При дослідженні сигнальної ефективності враховано, що мережа працює в полудуплексному режимі. Результати дослідження наведені в таблиці.

Таблиця 3.4 Енергетична, частотна, інформаційна та сигнальна ефективність радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi

Сигнально-кодова конструкція	V_b , Мбіт/с	$\gamma_{СКК}$, дБ	$P_b = 7,37 \cdot 10^{-3}$			$P_b = 1 \cdot 10^{-5}$		
			$\beta_{СКК}$, дБ	$\eta_{СКК}$, дБ	η_c	$\beta_{СКК}$, дБ	$\eta_{СКК}$, дБ	η_c
MCS0	6,5	-1.66	-0.93	0.771	0.386	-5.79	0.37	0.185
MCS1	13	1.35	-0.93	0.955	0.477	-5.79	0.519	0.26
MCS2	19,5	1.35	-2.23	0.796	0.398	-7.09	0.455	0.228
MCS3	26	4.36	-4.52	0.873	0.436	-9.63	0.58	0.29
MCS4	39	4.36	-5.82	0.776	0.388	-10.93	0.532	0.266
MCS5	52	6.12	-9.32	0.791	0.396	-14.69	0.591	0.295
MCS6	58	6.12	-9.92	0.763	0.381	-15.29	0.574	0.287
MCS7	65	6.12	-10.22	0.749	0.375	-15.59	0.567	0.283

Як видно з результатів дослідження, у технології Wi-Fi згідно зі стандартом IEEE 802.11n для збільшення швидкості передавання даних застосовують сигнально-кодові конструкції з більшою частотною ефективністю, проте при цьому енергетична ефективність зменшується. Тому високошвидкісне передавання даних можливе лише при великому відношенні потужності сигналу до потужності шуму в радіоканалі. Інформаційна ефективність при застосуванні різних сигнально-кодових конструкцій відрізняється в межах від 21% при імовірності бітової помилки

$P_6=7,37 \cdot 10^{-3}$ до 38% при імовірності бітової помилки $P_6=10 \cdot 10^{-5}$. Сигнальна ефективність дослідженого радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi у всіх випадках є меншою від інформаційної ефективності застосованої сигнально-кової конструкції, що пов'язано з впливом методу передавання даних.

Розглянуто запропоновану комплексну характеристику для оцінювання технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж - сигнальну ефективність. Показано можливість оцінювання ступеня впливу кожного із застосованих методів формування й оброблення сигналів на ефективність системи або мережі в цілому на прикладі радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi.

Досліджено енергетичну, частотну, інформаційну та сигнальну ефективність радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi згідно стандарту IEEE 802.11n залежно від застосованої для передавання даних сигнально-кової конструкції. Як видно з результатів дослідження, у технології Wi-Fi для збільшення швидкості передавання даних застосовують сигнально-кові конструкції з більшою частотною ефективністю, проте при цьому енергетична ефективність зменшується. Тому високошвидкісне передавання даних можливе лише при великому відношенні потужності сигналу до потужності шуму в радіоканалі. Інформаційна ефективність при застосуванні різних сигнально-кових конструкцій відрізняється в межах 38%. Сигнальна ефективність дослідженого радіоканалу у всіх випадках є меншою від інформаційної ефективності застосованої сигнально-кової конструкції, що пов'язано з впливом протоколу передавання даних.

3.4 Особливості стандартів безпроводового зв'язку IEEE 802.11n/ac

За останніми даними, зараз близько половини контенту, що передається по домашнім мережам, - це відео, яке вимагає високої пропускної здатності мережі. А оскільки найчастіше домашні мережі будуються з використанням технології Wi-Fi,

то з урахуванням того, що в найближчому майбутньому частка такого контенту буде рости і складе близько 91% всього трафіку, це вимагає розвитку і впровадження нових стандартів Wi-Fi.

Розроблюваний в даний час стандарт IEEE 802.11ac передбачає збільшення пропускної спроможності Wi-Fi-з'єднання до 1.5 Гбіт/с, що втричі більше, ніж передбачено широко поширеним стандартом 802.11n.

IEEE 802.11ac - стандарт бездротових комп'ютерних мереж, які повинні забезпечити високу пропускну здатність бездротових локальних мереж (WLAN) в діапазоні частот 5 ГГц.

Щоб показати відмінності між стандартами IEEE 802.11ac і IEEE 802.11n, нагадаємо коротко характеристики стандарту 802.11n.

До основних особливостей стандарту IEEE 802.11n слід віднести:

1. Об'єднання каналів (Channel Bonding) - об'єднання двох каналів з пропускну здатністю кожного 20 МГц в один з пропускну здатністю 40 МГц, що призводить до подвоєння пропускної здатності. Однак, з огляду на те, що в діапазоні 2.4 ГГц всього 3 неперекриваючіхся по частоті канали, використовувати канали з пропускну здатністю 40 МГц рекомендується тільки в діапазоні 5 ГГц.

2. Співіснування каналів з шириною по-смути 20/40 МГц (20/40 MHz Channels and Coe-xistence). При підключенні клієнт і точка доступу AP (Access Point) обмінюються ін-формацією (HT Information and Capabilities Elements), яка включає ширину смуги пропускання каналу, номер первинного каналу і зміщення вторинного каналу з шириною смуги пропускання 40 МГц. Щоб не допустити конфліктів при одночасній роботі двох і більше точок доступу точка доступу стандарту 802.11n повинна переходити на інший канал або переключитися на використання каналу з шириною смуги 20 МГц, якщо інша точка доступу починає передачу в смузі частот 20 МГц, що становить половину смуги каналу 40 МГц, який використовується першої AP [35].

3. Використання технологій MIMO (Multiple Input, Multiple Output - багато входів, багато виходів) і SP (Spatial Multiplexing - просторового об'єднання). При викорис-танні технології MIMO передача даних в бездротових мережах

здійснюється із застосуванням двох і більшого числа передавальних і приймальних антен. Що передають і приймають антени рознесені настільки, щоб забезпечити слабку кореляцію між сигналами сусідніх антен.

При використанні технології SP реалізується підвищення пропускної спроможності каналу зв'язку завдяки передачі сигналу одночасно на декількох несучих частотах (просторовим потоком - Spatial Streams) і подальшого прийому з об'єднанням в один потік даних. Це можливо при використанні індивідуальної антени і тракту прийому / передачі на приймальній і передавальній стороні для кожного потоку (рис. 3.6).

Так як ширина смуги пропускання каналу обмежена, то підвищити його пропускну здатність можна, збільшуючи відношення сигнал / шум на приймальному кінці. Цього можна досягти, якщо використовувати на приймальному кінці додаткові антени, що призведе до збільшення сумарної потужності сигналу. Ця технологія отримала назву SIMO (Single Input, Multiple Output - один вхід, багато виходів) або антенне рознесення на приймальному боці (рис. 3.7, а).

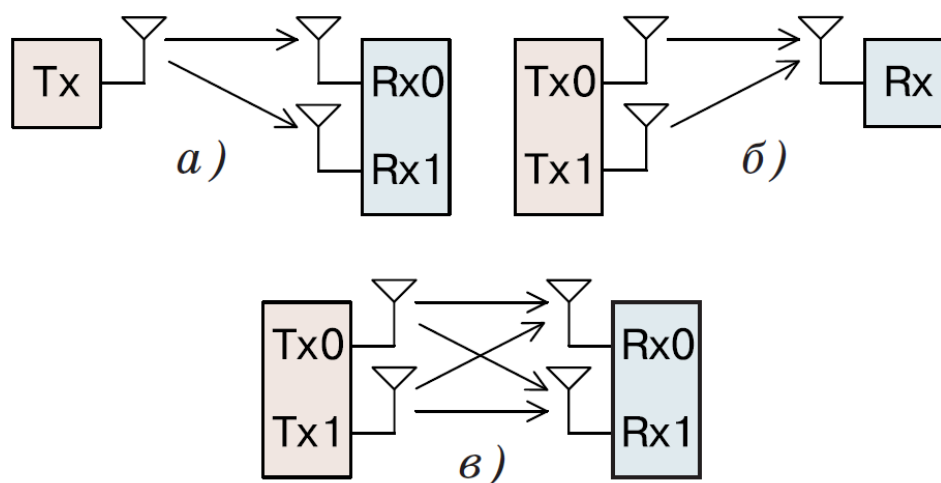


Рисунок 3.7 Використання багатоантенних технологій на передавальній і/або приймальній сторонах SIMO (а), MISO (б), MIMO (в)

Кілька антен можна використовувати і на передавальній стороні (рис. 3.7, б) - технологія MISO (Multiple Input, Single Output - багато входів, один вихід). Сигнали,

які надходять від декількох передавальних антен, складаються в приймальні антени, що призводить до збільшення потужності сигналу.

Однак застосування технологій SIMO і MISO буде ефективно тільки в певних межах, а саме: поки збільшення числа антен буде знижувати вплив рівня шуму на пропускну здатність каналу. Коли ж основним фактором, що впливає на пропускну здатність каналу, стане ширина смуги пропускання, настане режим насичення, тобто збільшення числа антен на прийальному або передавальному кінці не призведе до збільшення пропускну здатності каналу.

Від цього недоліку вільна третя модифікація багатоантенних систем, відповідна терміну MIMO (рис. 3.7, в). Кожен потік даних поширюється по своєму шляху. Залежно від шляху поширення сигналу потоки можуть приходити на приймач з різним рівнем потужності сигналу і різної затримкою. Прийнято користуватися позначенням " $M \times N$ ", де M - число потоків формуються для передачі, а N - число потоків, що формуються при прийомі. При використанні конфігурації 4×4 потоку MIMO теоретично швидкість передачі даних в каналі може скласти 600 Мбіт / с.

В даний час використовуються всі три багатоантенні технології.

4. Використання STBC (Space-Time Block Coding - блочного просторово-часового кодування) підвищує надійність прийому даних. Спрощено принцип блокового кодування полягає в розбитті потоку даних на блоки і ретрансляції блоку в різні часові інтервали. Таким чином, дотримується принцип багаторазової посилення даних і поліпшується стійкість схеми MIMO як такої. Однак кодування за допомогою блокових кодів енергетичного виграшу не дає.

5. Використання SGI (Short Guard Interval - короткого захисного інтервалу) - затримки між переданими символами для запобігання інтерференції між ними. Стандартний час затримки становить 800 нс, мале - 400 нс. Використання інтервалу SGI може збільшити пропускну здатність на 10%.

У порівнянні з попередніми стандартами стандарт 802.11n має кілька суттєвих відмінностей на каналному рівні, використання яких може подвоїти пропускну здатність:

1. Агрегацію пакетів (Packet Aggregation). Кілька пакетів TCP можуть бути об'єднані в один фрейм канального рівня, що дозволить зменшити обсяг переданих даних (рис. 2). Детальніше з механізмами агрегації пакетів можна ознайомитися в [2].

2. Блочне підтвердження (Block Acknowledgements). Доставка декількох пакетів може бути підтверджена на канальному рівні як доставка одного блоку, що буде зменшено число посланих фреймів підтвердження.

3. При підключенні клієнта до пункту доступу проводиться узгодження параметрів підключення. Стили підключення індексовані і виражаються простим числом MCS (Modulation and Coding Scheme - вид модуляції і схеми кодування). Параметри переданих сигналів, відповідні індексам MCS, наведені в таблиці.

Стандарт 802.11n регламентує три режими роботи точки доступу:

1. High Throughput (HT) або Greenfield Mode - режим з високою пропускнуою здатністю, в якому можуть працювати тільки точки доступу (клієнти), що підтримують стандарт 802.11n.

2. Non-HT (Legacy) Mode - успадковані режим, все фрейми, відправлені точкою доступу, сформовані відповідно до специфікації стандартів 802.11b/g (допустима ширина смуги пропускання каналу тільки 20 МГц).

3. HT Mixed Mode - змішаний режим, при якому використовуються переваги режиму з високою пропускнуою здатністю спільно з механізмом, який реалізує можливість роботи з обладнанням, відповідним стандартам 802.11b / g. Як мінус - для клієнтів, що користуються стандартами 802.11n, пропускна здатність нижче, ніж в HT-режимі. Механізм спільної роботи полягає в тому, що на канальному рівні пристрої, що відповідають стандартам 802.11n, передають фрейм з преамбулою старого формату, наступного за преамбулою формату 802.11n. Преамбула старого формату дозволяє клієнтам протоколів 802.11b/g передавати і приймати дані від точки доступу.

Для розуміння процесу передачі даних в мережах Wi-Fi слід ознайомитися з механізмом обробки колізій.

У бездротових мережах стандарту IEEE 802.11 для виявлення колізій використовується механізм CSMA / CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance - множинний доступ з контролем несучої частоти і униканням колізій). У мережі Wi-Fi передача даних здійснюється в напівдуплексному режимі, всі учасники передають і приймають по одному каналу. Таким чином, щоб уникнути колізій передача здійснюється тільки тоді, коли відправник упевнений в тому, що канал вільний. Кожен фрейм повинен бути підтверджений, якщо підтвердження відсутній, вважається, що сталася колізія, і фрейм передається через деякий час повторно. Справа ускладнюється тим, що може виникнути ситуація "прихованого вузла", коли два клієнта підключені до однієї точки доступу, але при цьому не знають про існування один одного (сигнал від одного клієнта не доходить до іншого, але досягає точки доступу). Для усунення проблеми застосовується наступний алгоритм. Клієнт перед передачею даних посилає точки доступу пакет RTS (Ready-to-send), який містить значення часу заняття каналу. Точка доступу відповідає CTS (Clear-to-send). Всі інші учасники мережі, отримавши пакет CTS, повинні утриматися від передачі даних на заданий час.

Таким чином, якщо в мережі одночасно працює кілька передавачів, це може значно знизити швидкість передачі даних. Якщо в обладнанні використовуються 2x2 потоку MIMO, то для забезпечення прийому / передачі виявляється зайнятим майже весь діапазон 2.4 ГГц. Природно, наявність сусідніх точок доступу буде знижувати швидкість передачі.

Збільшення пропускної здатності і з-відповідально швидкості передачі інформації в стандарті IEEE 802.11ac досягається пу-тем:

- збільшення смуги пропускання каналів до 80/160 МГц, що дозволяє подвоїти / потетверити швидкість передачі в порівнянні про стандартом 802.11n
- збільшення максимального числа потоків (Spatial Streams) до 8, що дозволяє подвоїти швидкість передачі інформації
- використання модуляції 256-QAM з еф-ність кодування 3/4 та 5/6, що дозволяє збільшити швидкість передачі

- використання на багато користувачів до-ступа MIMO (MU-MIMO - Multi-user MIMO) і алгоритму STA (Spanning Tree Algorithm - алгоритму покриває / зв'язує дерева мережі) при роботі з однією або декількома антенами, що дозволяє надсилати та отримувати одночасно кілька незалежних потоків даних

- використання множинного доступу з просторовим розділенням каналів (SDMA - Space Division Multiple Access), при якому потоки розділені не за частоті, а в просторі, аналогічно MIMO в стандарті 802.11n

- використання спадного (downlink) по-тока MU-MIMO (одне передавальний пристрій, кілька приймальних пристроїв) в якості додаткового.

Теоретично всі ці фактори дозволяють збільшити швидкість передачі інформації до 4.8 Гбіт/с, що в 8 разів перевищує теоретичну межу стандарту 802.11n. На практиці така швидкість недосяжна з кількох причин:

1. Нові канали не вписуються в діапазон 2.4 ГГц, тому пристрої стандарту 802.11ac найімовірніше будуть працювати в діапазоні 5 ГГц. Однак і з діапазоном 5 ГГц існують проблеми. У Європі без проблем і конфліктів з іншим обладнанням зв'язку можна працювати тільки на перших чотирьох каналах - 36/40/44/48 в діапазоні 5.15 ... 5.35 ГГц, а на інших каналах - в діапазоні 5.725-5.825 ГГц - необхідно включати режим DFS / TPC (співіснування з радарми), що ставить під сумнів можливість побудови надійної мережі. У смугу 5.15-5.35 ГГц поміщається тільки один канал, що відповідає стандарту 802.11ac, з пропускною здатністю 80 МГц. Отже, швидкість передачі слід зменшити в два рази.

2. Використання 8 просторових потоків (Spatial Streams) вимагає застосування приймачів і передавачів з 8 антенами для кожного. У мобільних пристроях, швидше за все, буде використовуватися схема MIMO не більше 4x4 через обмежені розмірів корпусу і необхідність економити споживання електроенергії. А це призведе до зменшення швидкості ще в два рази.

В результаті теоретично швидкість передачі може скласти 2.4 Гбіт/с.

Крім збільшення швидкості передачі інформації стандарт 802.11ac забезпечує два ключових поліпшення:

1. Можливість динамічно змінювати діаграму спрямованості антен (Beamforming), що реально для антенної решітки з 8 елементів. В ідеалі це означає, що зона покриття точки доступу оптимально підлаштовується під поточне розташування клієнтів. Beamforming є обов'язковою частиною стандарту 802.11n і тому не є новинкою. Цей режим вводиться для досягнення максимального ефекту при використанні технології MU-MIMO.

2. Використання технології MU-MIMO дозволяє повністю задіяти канал зв'язку і забезпечити можливість паралельної роботи декількох клієнтів. В існуючих мережах Wi-Fi зв'язок здійснюється в напівдуплексному режимі. Поки один клієнт передає дані інші можуть тільки приймати сигнал. Пакети передаються послідовно - в один момент часу передається один пакет.

Висновки до розділу 3

В розглянутій моделі розподілу каналного ресурсу ми прийшли до висновку, що при спільному обслуговуванні заявок декількох потоків, що мають істотну різницю в обсязі каналного ресурсу, необхідного для обслуговування однієї заявки, спостерігається неконтрольований оператором перерозподіл ємності каналного ресурсу.

Розглянуто принципи формування сигнально-кодівих конструкцій (СКК) для сучасних інфокомунікаційних систем. Запропоновано способи і нові технічні рішення для вибору виду сигнальної конструкції з метою досягнення найкращої пропускної здатності та продуктивності в каналі зв'язку безпроводових систем передачі, де показником є відношення рівня сигналу до рівня шуму на вході приймача.

Розглянуто запропоновану комплексну характеристику для оцінювання технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж - сигнальну ефективність. Показано можливість оцінювання ступеня впливу кожного із застосованих методів формування й оброблення сигналів на ефективність системи або мережі в цілому на прикладі радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі

технології Wi-Fi.

Проведений ретельний аналіз технологій Wi-Fi стандартів 802.11n/ac стосовно його теоретичних і практичних можливостей на сьогоднішній день в рамках проведеного нами дослідження. Як результат ми ще раз переконалися в доцільності нашої роботи та перспективаї використання цього стандарту для організації мультисервісного обслуговування.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ МУЛЬТИСЕРВІСНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ В БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ОБЛАДНАННЯ МІКРОТІК

Стандарт IEEE 802.11n дуже широко використовується в усьому світі. Тому не дивно, що з'явилась ідея організувати сучасне мультисервісне обслуговування саме в цьому стандарті.

В даному розділі йтиметься про дослідження мультисервісної мережі на основі обладнання вищезгаданого стандарту а також про результати відповідних випробувань на цій мережі.

4.1 Вибір безпроводового обладнання зв'язку для проведення досліджень та його характеристики

Через те, що стандарт 802.11n настільки популярний на ринку телекомунікацій, дуже багато виробників телекомунікаційного обладнання пропонують свою техніку для цього стандарту Wi-Fi. Внаслідок цього на ринку сформувався дуже високий рівень конкуренції, тому є дуже багато дійсно гарного обладнання.

Компанія Apple, більш відома іншої своєю продукцією, так само пропонує точку доступу AirPort Extreme, створену на основі стандарту 802.11n. Більшою мірою це рішення орієнтоване на домашнього користувача, для створення в умовах приміщення бездротової мережі, яка має широку функціональність. Як зазначається в описі цієї точки доступу, вона може одночасно обслуговувати до 50 абонентів. Для підключення до Глобальної мережі використовується порт 10/100Base-T.

Компанія Aruba Networks пропонує кілька точок доступу, які відповідають стандарту 802.11n. Ці пристрої можуть підключатися до електроживлення через мережу Ethernet за стандартом 802.3af. Для управління новими точками доступу можна використовувати систему Adaptive Radio Management, що випускається компанією Aruba. Зараз пропонується чотири моделі сімейства AP-120, що

відрізняються числом робочих діапазонів і варіантами антен. У цьому сімействі використовується MIMO варіанту 3x3. Так само Aruba Networks пропонує спеціалізовану платформу RAP-5WN для малого офісу або домашнього застосування. Ця платформа може працювати в діапазонах 2,4 ГГц і 5ГГц, в ній передбачено підключення до модему 3G для резервування основної лінії доступу.

Ще один відомий виробник бездротових рішень Bluesocket поставляє на ринок точку доступу BSAP-1800. Це пристрій підтримує роботу двох радіотракт в обох діапазонах частот (2,4 і 5 ГГц) і може бути оснащено як зовнішніми, так і внутрішніми антенами. Для реалізації можливості передачі двох потоків зі швидкістю 150 Мбіт / с це пристрій оснащений інтерфейсом Gigabit Ethernet. Так само підтримується технологія електроживлення по стандарту 802.3af поверх мережі Ethernet. Точка доступу BSAP-1800 підтримує технологію Bluesocket DynamicRF, що дозволяє оптимізувати радіопокриття і знизити вплив перешкод. Ще одним плюсом свого обладнання виробник вважає підтримку простого розгортання цих точок доступу при використанні контролера. Їх досить просто підключити до мережі і необхідна конфігурація буде отримана з контролера.

Компанія Cisco пропонує сьогодні дві точки бездротового доступу, в яких реалізований даний протокол. Це точка Cisco Aironet 1140, яка виконана в компактному корпусі і призначена для установки в приміщеннях. Конструктивне виконання іншої точки доступу Cisco Aironet 1252 дозволяє її використовувати в різних погодних умовах. Ця точка доступу має модульну конструкцію, що забезпечує нарощування функціональних можливостей в майбутньому. Точка 1252 так само має можливість підключення зовнішніх антен. За запевненням виробника, реальна пропускна здатність цих пристроїв перевищує 170 Мбіт/с при максимальній пропускній здатності 300 Мбіт/с (для стандарту 802.11n і смузі сигналу 40 МГц). Точки доступу Cisco Aironet 1140 і Cisco Aironet 1252 підтримують зворотну сумісність з існуючими мережами і пристроями стандарту 802.11a/b/g.

Для обладнання стандарту 802.11n компанія Cisco розробляє розширений функціонал під назвою M-Drive. Зокрема, планується функція ClientLink, яку можна розглядати в якості "віртуальної труби" між точкою доступу і клієнтським

пристроєм. Завдяки цій функції з'явиться можливість фокусувати просторове поле випромінювання точки доступу в сторону клієнта з урахуванням його переміщень в просторі.

Компанія NetGear розробила ціле сімейство точок доступу стандарту, що ми розглядаємо. У їх числі точка доступу WNDAP330, яка працює на частоті 5 ГГц для запобігання перешкод від мережевих пристроїв 802.11b або 802.11g і має можливість перемикання в діапазон 2,4 ГГц для забезпечення сумісності з цими стандартами. У ній використовується електроживлення поверх Ethernet за технологією 802.3af. Точка доступу WNAP210 призначена тільки для роботи в діапазоні 2,4 ГГц. За запевненням виробників вона може підтримувати одночасну роботу до 30 користувачів. Точка доступу WN802Tv2 підтримує режим WDS для розширення покриття мережі, вона має вбудовані антени і призначена для роботи в діапазоні 2,4 ГГц. Дана точка доступу підтримує призначення пріоритетів за видами трафіку. Точка доступу RangeMax NEXT Wireless-N WN802T розширює домашню мережу або мережу невеликого офісу за рахунок підтримки швидкості до 300 Mbps і підключення по Gigabit Ethernet до магістральної мережі.

Компанія Proxim Wireless пропонує дві точки, що підтримують новий стандарт. Це моделі AP-800 і AP-8000 з сімейства ORINOKO, основною відмінністю яких можна вважати число частотних діапазонів для одночасної роботи. Старша модель може працювати одночасно в діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц, а молодша тільки в одному з двох. Обидві точки доступу працюють в режимі MIMO 3x3 і здатні передавати на швидкостях 170 Мбіт/с (AP-800) і 320 Мбіт/с (AP-8000). Для розгортання і управління цими точками доступу виробник рекомендує використовувати централізовану систему управління ProximVision ES. Для електроживлення точок доступу може бути використана технологія 802.3af.

Компанія Ruskus Wireless пропонує рішення ZoneFlex 7942, яке позиціонується як центрально-керована мультимедійна точка доступу, повністю підтримує стандарт 802.11n. Ця точка доступу орієнтована на використання як в складі корпоративних мереж, так і в якості обладнання хот-спотів операторських мереж. Для спрощення розгортання і експлуатації мережі даних точок доступу виробник рекомендує

застосовувати центральний контролер ZoneDirector, що випускається ними же. У точці доступу ZoneFlex 7942 реалізована запатентована компанією технологія BeamFlex, в основі якої лежить використання програмно-керованих антен. Ця технологія покликана забезпечити адаптацію радіосигналів до постійно змінюваних умов, наприклад при переміщенні абонентів.

Компанія Trapeze випустила своє рішення з підтримкою стандарту 802.11n. Це точка доступу MP-432, що здатна працювати в діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц, підтримуючи максимальну сукупну швидкість передачі до 600 Мбіт/с. Точка обладнана внутрішніми антенами і працює в конфігурації MIMO 3x3 або 2x3. Точка доступу оснащена двома портами GigabitEthernet з підтримкою стандартів електроживлення 802.3af, 802.3af + або 802.3at. Від обраного варіанту електроживлення залежить режим роботи антен.

Інша точка доступу MP-82, так само підтримує стандарт 802.11n, позиціонується виробником як рішення для використання всередині приміщень в умовах роботи великого числа інших точок доступу. Характеристики даної точки доступу аналогічні MP-432, окрім обраного режиму MIMO. У точці доступу MP-82 використовується лише конфігурація 2x3, що дозволяє спростити варіант електроживлення, обмежившись тільки 802.3af.

TRENDNet анонсує досить широку лінійку бездротового обладнання, що працює за новим стандартом. Це і бездротові маршрутизатори для домашнього та офісного застосування, різні адаптери для клієнтських пристроїв і, звичайно, точки доступу. Точка доступу TEW-630APB працює в діапазоні 2,4 ГГц і дозволяє бездротовим клієнтам встановлювати з'єднання зі швидкістю до 300 Мбіт/с. У ній реалізована технологія розподіленої бездротової системи WDS, що дозволяє розширити зону дії бездротової мережі за рахунок підключення додаткових точок бездротового доступу, що відповідають новому стандарту. Інша точка TEW-636APB має аналогічні характеристики радіотракта, але володіє більш широким функціоналом як мережевий пристрій. Зокрема, вона підтримує аутентифікацію 802.1x і RADIUS. Мережевими можливостями відрізняється ще одна точка доступу

TEW-638APB, в якій реалізована підтримка стандарту 802.11e Quality of Service (QoS).

Компанія ZyXEL звертає увагу на спеціалізований Internet-центр NBG460N з можливістю підключення на швидкостях Fast Ethernet і Gigabit Ethernet. Цей Internet-центр так само має вбудовану точку доступу 802.11n, повністю відповідає попередній версії стандарту, і комутатором Gigabit Ethernet. За запевненням виробника, цей пристрій, незважаючи на свої скромні габарити і вагу, має високу швидкість маршрутизації (до 500 Мбіт/с) і розширені можливості для створення корпоративних і бездротових мереж. Зокрема, забезпечується одночасна робота з Internet і ресурсами операторської мережі завдяки технології Link Duo, високошвидкісний апаратний шлюз на два VPN-тунелю і підтримка IP-телебачення (TVport). Це рішення компанія ZyXEL орієнтує на використання в різних конфігураціях з підключення абонентів. Наприклад, для створення бездротової мережі в невеликих офісах і малих підприємствах, в яких великий трафік передачі даних.

Однак після вивчення ринку Wi-Fi обладнання стандарту 802.11n, було вирішено, що найбільш раціональним і вигідним в нашому випадку буде варіант обладнання компанії MikroTik. Характеристики обраного обладнання, на базі якого побудована реальна експериментальна мультисервісна мережа представлені нижче.

Точка доступу MikroTik RBSEXTANTG-5HPnD.

MikroTik SEXTANT G-5HPnD - це гігабітна Wi-Fi точка доступу на 5 ГГц з високою вихідною потужністю 30 дБм (1 Вт).

Усередині вологонепроникного корпусу знаходиться плата роутера RB911G і MIMO антена з коефіцієнтом посилення 18 dBi. На платі встановлений продуктивний процесор Atheros AR9342 з частотою 600 МГц, оперативна пам'ять 32 МБ і один гігабітний LAN порт.

MikroTik SEXTANT G-5HPnD зазвичай використовують для організації швидкісного Wi-Fi моста або для підключення до базової станції в якості клієнтського пристрою.

У пристрої передумовленна операційна система RouterOS Level 3. Живлення подається на пристрій по кабелю «вита пара» за допомогою POE інжектора, який входить в комплект поставки.

Таблиця 4.1 Характеристики MikroTik SEXTANT G-5HPnD

Система	
Процесор:	Atheros AR9342 600 МГц
RAM:	32 MB SDRAM
Flash:	64 MB
Порти:	1 × 10/100/1000 Base-TX (Cat. 5, RJ-45) Ethernet 2 × MMCX
ОС:	MikroTik RouterOS Level3 license
Радіомодуль	
Стандарти:	802.11a/n
Режими роботи:	Station Point-to-point
Теор. пропускна здатність:	300 Мбіт/с
Частоти:	4900–5960 МГц
Чутливість приймача:	802.11a: -96 dBm @ 6Mbps ⇒ -80 dBm @ 54 Mbps 802.11n: -96 dBm @ MCS0/8 ⇒ -78 dBm @ MCS7/15
Потужність передавача:	802.11a: 30dBm @ 6Mbps ⇒ 27dBm @ 54 Mbps 802.11n: 30dBm @ MCS0/8 ⇒ 24dBm @ MCS7/15
Вбудована антена	
Підсилення:	18 dBi
Поляризація:	Подвійна
Кроссполяризація розв'язка:	35 dB
Гор. поляризація:	16,8°
Верт. поляризація:	22,8°
Інше	
Розміри:	діаметр: 250 мм; висота 90 мм
Маса:	830 гр
Електроживлення:	24В, 0,8А, POE-адаптер в комплекті
Робоча температура:	від -30°C до +65°C

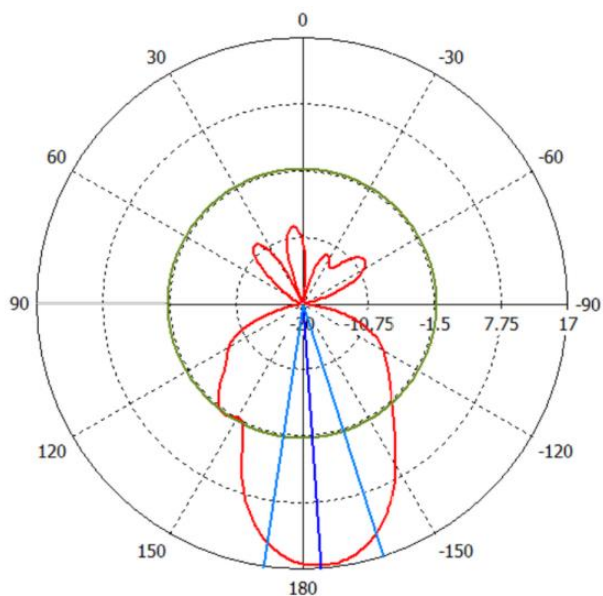


Рисунок 4.1 Діаграма спрямованості MikroTik SEXTANT G-5HPnD



Рисунок 4.2 Фото точки доступу MikroTik SEXTANT G-5HPnD у процесі юстування

Комутатор MikroTik RB260GSP.

MikroTik RB260GSP - це керований гігабітний комутатор з можливістю живити інші пристрої за технологією POE. LAN порти 2-5 на виході видають напругу 24V

1А для цієї задачі. Подачу напруги на цих портах можна відключити в налаштуваннях комутатора.

Комутатор наділений наступними портами:

5 × гігабітних мережевих портів

1 × оптичний SFP порт

Для підключення оптоволокна використовувався фірмовий SFP модулі MikroTik S-85DLC05D.

У комутаторі встановлена операційна система SWOS, настройка якої виконується через Web-браузер.

Можливості SWOS:

- обмеження швидкості;
- фільтрація MAC;
- управління VLAN;
- форвардного портів;
- віддзеркалення трафіку.

Таблиця 4.2 Характеристики MikroTik RB260GSP

Система	
Процесор:	Taifatech TF470
RAM:	96K SRAM
Порти:	5×1000 Мбіт/с LAN 1×SFP cage Gigabit Ethernet (Mini-GBIC; SFP модуль не входить у комплектацію)
ОС:	MikroTik SwOS
Доп. функції	
Watchdog:	Апаратний
Керування пристроєм:	WEB інтерфейс
Інше	
Електроживлення:	Passive PoE: 8..30 V DC on Ethernet port1 (Тільки 4,5,7,8 виводи, не 802.3af) Jack: 8..30 V DC
PoE output:	Passive PoE на виході портів 2-5. Максимальна сила току 1А на порт.

Потребление:	до 6 Вт
Размеры:	113 × 138 × 29 мм
Маса:	212 гр
Рабочая температура:	від -25°C до +65°C



Рисунок 4.3 MikroTik RB260GSP

4.2 Реалізація розробленої експериментальної мультисервісної мережі

В даному натурному випробуванні ми налаштовували мультисервісну мережу, яка повинна забезпечувати наступні види послуг: доступ до корпоративної інформаційної мережі, доступ до мережі Інтернет, а також організація IP-телефонії.

По оптоволокну трафік перерахованих вище сервісів подається на SFP модуль комутатора MikroTik RB260GSP, який знаходиться на стороні AP (Access Point - вона ж точка доступу, наше пристрій, що працює в режимі «Master» по відношенню до двох інших точок доступу: ST1 і ST2, що включені в режимі «Slave»). На комутаторі прийнятий трафік розбивається на vlan-и: [vlan 10], [vlan 20] ... і т.д. , - таким чином, що кожному сервісу відповідає свій окремий vlan. Робиться це для того, щоб у нас була можливість управління трафіком, так як ми маємо справу з IP-мережею, і весь трафік, що передається в ній розбивається на IP-пакети. А шляхом поділу сервісів ми працює з тегованих трафіком, який таким чином розмежовує IP-пакети.

Далі з виходу комутатора гігабітним патч-кордом ми підключаємо безпосередньо точку доступу MikroTik SEXTANT G-5HPnD. Ми встановлюємо в

програмній оболонці WinBox bridge-з'єднання між відповідними [vlan 10] -> [wlan 10], [vlan 20] -> [wlan 20] і так далі. Таким чином ми зберігаємо поділ трафіку на тегований трафік по різних wlan-ах і не втрачаємо можливість управління кожним сервісом окремо.

На приймальній стороні з боку ST1 і ST2 мережу влаштована аналогічно, за винятком того, що використовуються комутатори MikroTik RB260GS без SFP-модуля. Прийнятий комплексний тегований трафік знову ж розбивається на відповідні vlan-и для різних сервісів. Далі кожній фізичній гігабітного Ethernet-порту ставиться у відповідність свій один vlan. Після цього патч-кордом вихід кожного порту з'єднується з відповідним призначенням для користувача обладнанням.

Ключовою особливістю же даної мережі є те, що ми встановлюємо не просто з'єднання «точка-точка» між точками доступу MikroTik, а ми один пристрій, позначений як AP, з'єднуємо одночасно з двома пристроями, позначеними як ST1 і ST2.

Справа в тому, що в кожен момент часу точка доступу MikroTik працює тільки з одним клієнтським Wi-Fi-обладнанням з усієї Wi-Fi-мережі. Передача даних відбувається в напівдуплексному режимі, тобто по черзі - від точки доступу до клієнтського адаптера, потім навпаки і так далі. Одночасний, паралельний процес передачі даних (дуплекс) в технології Wi-Fi неможливий.

Якщо в Wi-Fi-мережі два клієнта, то точки доступу потрібно буде комутувати в два рази частіше, ніж якби клієнт був один, тому що в технології Wi-Fi використовується напівдуплексна передача даних. Так як процесорної потужності для цього в пристроях MikroTik SEXTANT G-5HPnD вистачає, то ця ідея залишається можливою. Відповідно, швидкість передачі даних між двома точками доступу буде в нижче, ніж максимальна реальна швидкість для одного клієнта (мова йде про передачу даних від одного комп'ютера іншому по Wi-Fi-з'єднання).

Залежно від віддаленості клієнта Wi-Fi-мережі від точки доступу або від наявності різних перешкод і перешкод буде змінюватися теоретична і, як наслідок, реальна швидкість передачі даних. Спільно з бездротовими адаптерами точка доступу змінює параметри сигналу, його сигнально-кодову конструкцію в

залежності від умов в радіоефірі (відстань, наявність перешкод і перешкод, зашумленості радіоефіру та інших факторів).

Тому для оптимального прийому двома приймаючими точками доступу за критерієм максимізації сумарної швидкості передачі інформації (за умови, що швидкість передачі інформації для кожної з них не менше 20 Мбіт / с) ми провели юстування точки доступу AP.

На практиці ж, маючи пряму видимість в обох випадках з'єднання, вийшло, що ST1, ST2 спрямовані точно на AP, а сама точка доступу AP спрямована так, що промінь її найбільш інтенсивного випромінювання спрямований між приймаючими пристроями. Завдяки тому, що приймаючі точки доступу розташовані близько один до одного, з'єднання було встановлено вдало.

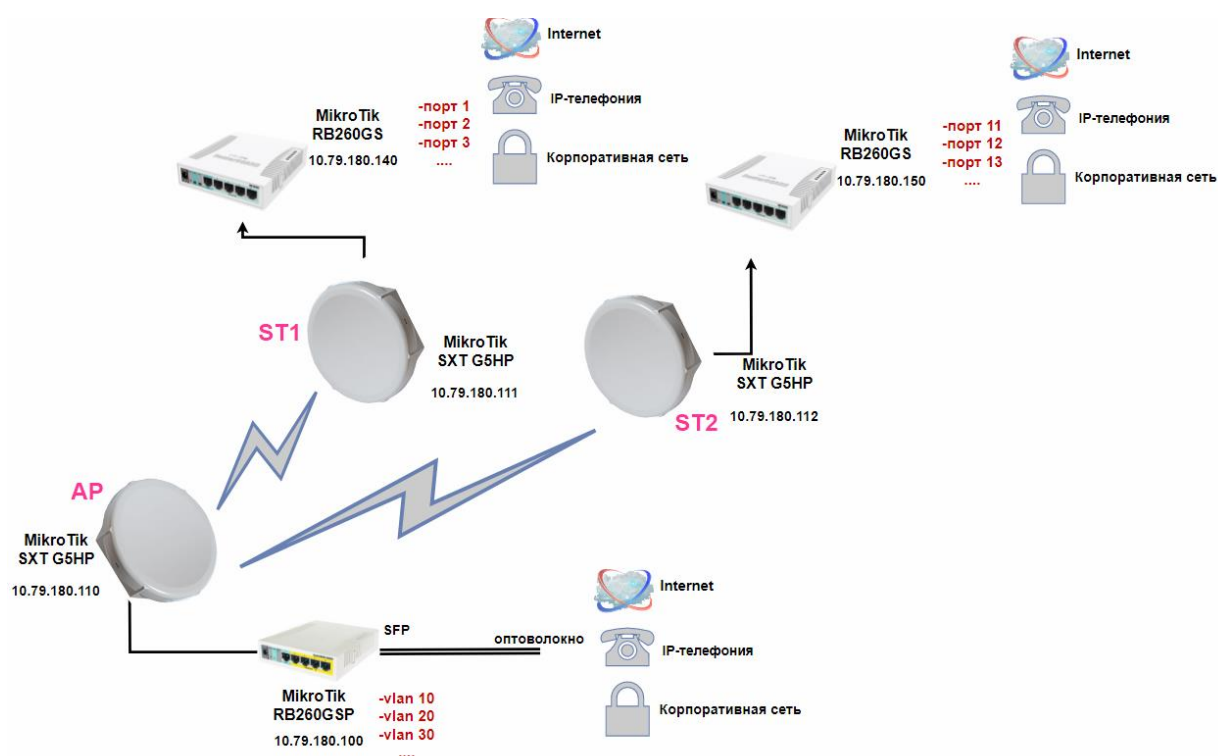


Рисунок 4.4 Схема підключення обладнання в тестовій мережі

Таблиця 4.3 Параметри точок тестування та погодні умови

Відстань, км:	АБ=1.5 АВ=1.6	Точка А (AP)	Точка Б (ST1)	Точка В (ST2)
Адреса, координати, висота над рівнем моря		Вул. Фастівська 40-а, 50.422796 / 30.440700, 140 м	Вул. Медова 16-б, корпус 3, 50.441735 / 30.452341, 137 м	Вул. Медова 20, корпус 2, 50.441052 / 30.453712, 137 м
Висота підйому антени над рівнем землі		60 м	22 м	26 м
Температура		0	0	0
Швидкість вітру		15 км/год	15 км/год	15 км/год
Опади		Слабкий мокрий сніг	Слабкий мокрий сніг	Слабкий мокрий сніг



Рисунок 4.5 Розташування точок доступу AP і ST1 на карті Києва

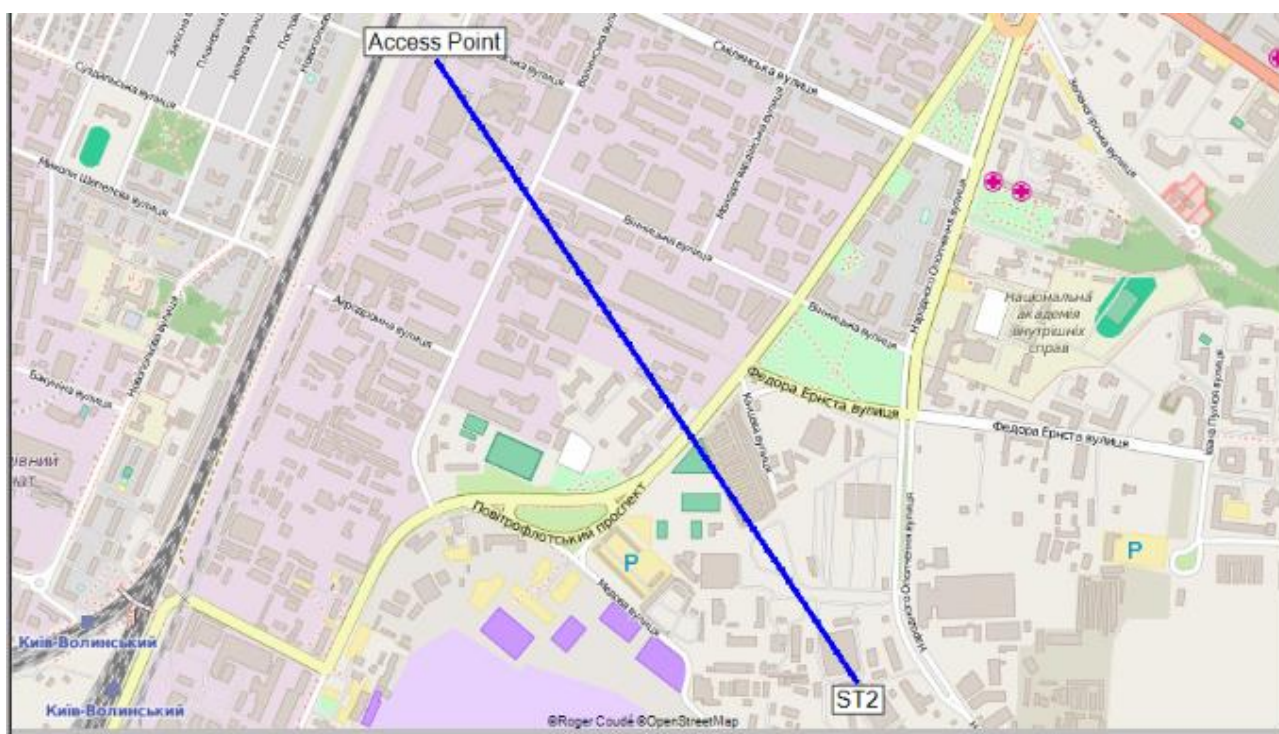


Рисунок 4.6 Розташування точок доступу AP і ST2 на карті Києва

Максимально досягнута швидкість передачі TCP трафіку в досліджуваній мережі при певних енергетичних рівнях склала 80 Мбіт/с. Всі подальші вимірювання відбувалися при заданих незмінних параметрах каналу.

Будь-яка мультисервісна мережа повинна підтримувати ключові види сервісів. У табл. 4.4 міститься список деяких з найбільш поширених Wi-Fi Multimedia (WMM) категорій сервісів. Кожен вид послуги включається в одну з чотирьох категорій, які отримують привілейований доступ до середовища (QoS). У порядку зменшення пріоритету, трафік може бути поміщений в черзі для передачі голосу, відео, чергу з найкращим зусиллям, і фоновий трафік.

Таблиця 4.4 Види послуг мультисервісної мережі, рекомендації по необхідній швидкості і групи WMM

Вид сервісу	Рекомендована швидкість передачі даних (Мбіт/с)	Категорія сервісу
VoIP-трафік	27 – 93 кбіт/с	Голос
VoIP-сигнальний трафік	5 кбіт/с	найкраще зусилля
Віддалений робочий стіл	150 кбіт/с – 1.8 Мбіт/с	Голос
Веб-конференція	384 кбіт/с – 1 Мбіт/с	Голос

ТВ відео потік	2.5 – 8 Мбіт/с	Відео
Відео високої чіткості (стисле)	2 – 5 Мбіт/с	Відео
Відео високої чіткості (нестисле)	20 Мбіт/с	Відео
Відео високої чіткості (нестисле HDTV)	3.3 Гбіт/с	Відео
Відео звичайної чіткості	1 – 1.5 Мбіт/с	Відео
Емейл/перегляд веб-сторниць	0.5 – 1.0 Мбіт/с	найкраще зусилля
Обмін файлами	від 5 Мбіт/с	найкраще зусилля
YouTube	0.9 Мбіт/с	найкраще зусилля

При тестуванні мультисервісної мережі нами використовувалося наступне програмне забезпечення:

1) Winbox - офіційне програмне забезпечення від компанії MikroTik, яке надає графічний інтерфейс для налаштування Wi-Fi обладнання, його управління, моніторингу за різними параметрами в каналах та інших цілей;

2) Iperf - кросплатформова консольна клієнт-серверна програма-генератор TCP і UDP трафіку для тестування пропускної здатності мережі. Мережевий канал обмежений двома вузлами, що працюють під управлінням Iperf.

3) Ace Stream Media Center - це медіа-платформа нового покоління, з децентралізованою/розподіленою системою постачання і зберігання мультимедійних даних, призначена для створення інтернет-сервісів з функціями AVoD (Аудіо та Відео по Запиту) і Live Streaming («живого»/потокowego мовлення), з великою соціальною і інтерактивною складовою. Дана програма використовувалася для створення аудіо- та відео-потоків в каналах мережі.

4) Golden FTP Server - програмне забезпечення, що дозволяє встановити сервер на одному з ПК. дана програма використовувалася при тестуванні передачі файлу даних.

Характеристики лінка й отримані результати тесту пропускної здатності мережі представлені нижче:

Interface List

Interface	Type	Actual MTU	L2 MTU	Tx	Rx	Tx Packet (p/s)	Rx Packet (p/s)	FP Tx	FP Rx	FP Tx Packet (p/s)	FP Rx Packet (p/s)
R	bridge2075-inet	Bridge	1500	1596	0 bps	672 bps	0	2	0 bps	0 bps	0
R	bridge2141-management	Bridge	1500	1596	199.2 kbps	10.4 kbps	17	14	0 bps	9.7 kbps	0
R	ether1	Ethernet	1500	1600	6.9 Mbps	5.7 Mbps	954	808	6.9 Mbps	5.7 Mbps	954
RS	vlan2075-inet-lan	VLAN	1500	1596	6.6 Mbps	5.7 Mbps	923	781	6.6 Mbps	5.7 Mbps	923
RS	vlan2141-management-lan	VLAN	1500	1596	292.7 kbps	19.6 kbps	31	27	133.5 kbps	19.6 kbps	14
R	wlan1	Wireless (Atheros AR9...	1500	1600	5.7 Mbps	6.7 Mbps	795	937	5.6 Mbps	6.7 Mbps	782
RS	vlan2075-inet-wlan	VLAN	1500	1596	5.7 Mbps	6.6 Mbps	781	923	5.7 Mbps	6.6 Mbps	779
RS	vlan2141-management-wlan	VLAN	1500	1596	9.9 kbps	133.5 kbps	14	14	9.1 kbps	133.5 kbps	13

Bridge

Name	Type	L2 MTU	Tx	Rx	Tx Packet (p/s)	Rx Packet (p/s)	FP Tx	FP Rx	FP Tx Packet (p/s)	FP Rx Packet (p/s)	MAC Address	Protocol
R	bridge2075-inet	Bridge	1596	0 bps	672 bps	0	2	0 bps	0 bps	0	0 4C:5E:0C:E0:0F:AF	none
R	bridge2141-management	Bridge	1596	159.2 kbps	10.4 kbps	17	14	0 bps	9.7 kbps	0	13 4C:5E:0C:E0:0F:AF	none

2 items out of 8 (1 selected)

Рисунок 4.7 Характеристики з'єднань AP-ST1 та AP-ST2

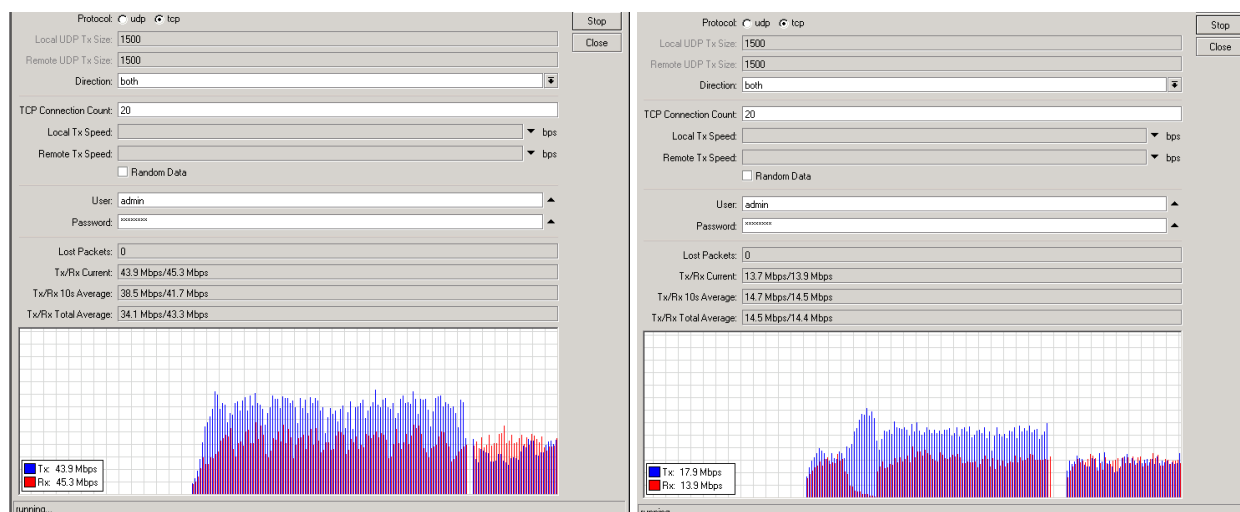


Рисунок 4.8 Тест пропускної здатності двох лінків AP-ST1 та AP-ST2 відповідно. (Синій колір - UDP-трафік, червоний колір - TCP-трафік)

Експериментальна частина дослідження мережі, що була побудована нами, включала трансляцію аудіопотоку в форматі MP3, відеопотоку у форматі MPEG-2, що виконано за допомогою програмного продукту Ace Stream Media Center. Для передачі даних проводився тест швидкості передачі файлу даних між FTP сервером і клієнтом. Стани інтерфейсів підключення і швидкості передачі були виміряні в утиліті Winbox.

Якість надання послуг (QoS) включає в себе дотримання вимог до Wi-Fi Multimedia (WMM) сертифікації, яка розділяє категорії сервісів на чотири класи з

різних пріоритетом. Інші підходи до організації черг можуть бути використані для підвищення якості обслуговування певних сервісів, в залежності від постановки задачі.

Висновки до розділу 4

В даному розділі було описано дослідження організації мультисервісного обслуговування в стандарті 802.11n. Для експериментальної частини роботи спершу було проведено аналіз сучасного ринку безпроводового обладнання зв'язку стандарту 802.11n. Завдяки тому, що це дуже популярний стандарт і, як наслідок великої конкуренції між багатьма виробниками, на ринку телекомунікацій є дуже багато якісних та відносно доступних мереживих пристроїв. Найбільш раціональним для нашого експерименту було обладнання компанії MikroTik.

Була створена мультисервісна мережа на базі обладнання MikroTik відповідного стандарту за топологією «точка-точка». Використовуючи наступне програмне забезпечення: Winbox, Iperf, Ace Stream Media Center, Golden FTP Server, - експериментально досліджена реальна мультисервісна мережа, що була розгорнута в Солом'янському районі міста Києва, на основі стандарту IEEE 802.11n. Ми ще раз переконалися в тому, що можна організовувати мультисервісні безпроводові мережі зв'язку на базі таких експериментальних мереж: здійснювати одночасну передачу потокового аудіо, відео, передачу файлів, із забезпеченням необхідних зумовлених QoS. При цьому одночасно ми вдало передавали 3 типи мультисервісного трафіку: 1) аудіо формату MP3 (швидкість передачі – 0,145 Мбіт/с; якість звуку відмінна); 2) відео формату MPEG-2 (швидкість передачі – 5,9 Мбіт/с; якість відеозображення відмінна); 3) підключення до мережі інтернет (зі змінною швидкістю передачі даних до 34,5 Мбіт/с).

Як наслідок, вищеописана мультисервісна мережа підтвердила теоретичні прогнози, що на основі обладнання стандарту IEEE 802.11n можна здійснювати мультисервісне обслуговування та була, відповідно, джерелом практичного дослідження показників мультисервісного обслуговування.

ВИСНОВОК

У першому розділі даної роботи досліджені теоретичні аспекти щодо сучасних безпроводових телекомунікаційних мереж – а саме, тенденції розвитку телекомунікаційних безпроводових мереж. Попри відмінності між різними технологіями: Wi-Fi, LTE, майбутні технології 5G, - кожна з них знайшла свою нишу у світі телекомунікацій, в деяких ситуаціях одна з технологій не має жодних альтернатив (а якщо такі альтернативи є – вони не є раціональними з економічної точки зору), а в деяких технологічних рішеннях вони співіснують.

Роль Wi-Fi мереж з розвитком мереж 4G не тільки не падає, а зростає. Що ставить перед технологією все нові і нові швидкісні виклики. Розвиток мереж зв'язку в перспективі буде відбуватися в рамках реалізації основних положень концепції мереж наступного покоління NGN. Вона формує правила побудови мереж зв'язку, що забезпечують надання необмеженого набору послуг з заданими характеристиками якості. Мережі будуються на основі пакетних технологій. Профіль послуг і їх якість не залежать від того, де знаходиться абонент, як і з якою швидкістю він пересувається і яка при цьому використовується транспортна технологія для передачі інформації. Мультисервісна мережа - мережа зв'язку, побудована відповідно до концепцій NGN для обслуговування трафіку різних комунікаційних додатків (голос, відео, дані).

Детально розглянута технологія Wi-Fi IEEE 802.11. Виконано порівняння стандартів цієї технології, розглянуто місце цього стандарту в моделі OSI та надана характеристика стандарту 802.11n на фізичному та каналному рівнях.

Концепція мультисервісних мереж народилася не на порожньому місці. Її основні положення узагальнюють досвід реалізації найбільш успішних телекомунікаційних проєктів, головним чином, мережі Інтернет і мереж рухомого зв'язку. Вражаючі темпи розвитку відповідних мереж, їх живучість, відкритість, спрямованість на задоволення потреб користувача і ряд інших позитивних характеристик дають можливість використовувати отриманий досвід у формуванні фундаментальних принципів побудови мультисервісних мереж.

Побудована модель мультисервісної мережі зв'язку з узагальненою схемою резервування каналного ресурсу. Модель може бути застосована для оцінки характеристик спільного обслуговування довільного числа потоків повідомлень, як на рівні доступу, так і на рівні транспортного ядра. Показано, що значення показників обслуговування заявочка виділення каналного ресурсу в слабкому ступені залежать від типу функції розподілу часу утримування каналного ресурсу. Залежність проявляється тільки через значення середнього часу утримування ресурсу на передачу повідомлення.

Основою системи забезпечення якості можуть стати дві архітектури QoS - на базі інтегрованих і на базі диференційованих служб, орієнтовані відповідно на периферійне мережеве обладнання та магістральні пристрої глобальних мереж. В свою чергу мережеві рішення щодо забезпечення якості сервісу можуть сильно відрізнятися в залежності від завдань, що вирішуються сервіс-провайдерами.

Проаналізовані способи оцінки якості обслуговування в мультисервісних мережах в рамках нашого дослідження.

В розглянутій моделі розподілу каналного ресурсу ми прийшли до висновку, що при спільному обслуговуванні заявок декількох потоків, що мають істотну різницю в обсязі каналного ресурсу, необхідного для обслуговування однієї заявки, спостерігається неконтрольований оператором перерозподіл ємності каналного ресурсу.

Розглянуто принципи формування сигнально-кодових конструкцій (СКК) для сучасних інфокомунікаційних систем. Запропоновано способи і нові технічні рішення для вибору виду сигнальної конструкції з метою досягнення найкращої пропускної здатності та продуктивності в каналі зв'язку безпроводових систем передачі, де показником є відношення рівня сигналу до рівня шуму на вході приймача.

Розглянуто запропоновану комплексну характеристику для оцінювання технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж - сигнальну ефективність. Показано можливість оцінювання ступеня впливу кожного із застосованих методів формування й оброблення сигналів на ефективність системи

або мережі в цілому на прикладі радіоканалу телекомунікаційної мережі на основі технології Wi-Fi.

Проведений ретельний аналіз технологій Wi-Fi стандартів 802.11n/ac стосовно його теоретичних і практичних можливостей на сьогоднішній день.

Звідси й випливає перспектива використання саме мультисервісних мереж безпроводового зв'язку.

Для експериментальної частини роботи спершу було проведено аналіз сучасного ринку безпроводового обладнання зв'язку стандарту 802.11n. Найбільш раціональним для нашого експерименту було обладнання компанії MikroTik.

Була створена мультисервісна мережа на базі обладнання MikroTik SexTant відповідного стандарту за топологією «точка-багатоточка». Використовуючи наступне програмне забезпечення: Winbox, Iperf, Ace Stream Media Center, Golden FTP Server, - експериментально показано, що на основі стандарту IEEE 802.11n можна організовувати мультисервісні безпроводові мережі зв'язку: здійснювати одночасну передачу потокового аудіо, відео, передачу файлів, із забезпеченням необхідних зумовлених QoS. При цьому одночасно ми вдало передавали 3 типи мультисервісного трафіку: 1) аудіо формату MP3 (швидкість передачі – 0,145 Мбіт/с; якість звуку відмінна); 2) відео формату MPEG-2 (швидкість передачі – 5,9 Мбіт/с; якість відеозображення відмінна); 3) підключення до мережі інтернет (зі змінною швидкістю передачі даних до 34,5 Мбіт/с).

Теоретично і експериментально було досліджено показники реальної мультисервісної мережі на основі стандарту IEEE 802.11n, на якій була практично доведена можливість організовувати якісні мультисервісні послуги із забезпеченням необхідних зумовлених QoS. А через те, що ринок телекомунікаційного устаткування переповнений обладнанням для цього стандарту, такі мультисервісні мережі є доступними і дуже перспективними зараз.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Колюбякин В. «Беспроводные мультисервисные сети»- М.: Теле-спутник. 2016.
2. IEEE Standard 802.11n-2009 – IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput.
3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2010. – 916 с. 4 вид
4. Созикін А. Сети и системы телекоммуникаций WiFi [Электронный ресурс]. URL: <http://www.slideshare.net/AndreySozykin/09-networks1>.
5. Джим Гейер. Беспроводные сети. Первый шаг: Пер. с англ. — М. : Издательский дом "Вильяме", 2005. — 192 с.: ил. — Парал.тит. англ.
6. «Оборудование беспроводных сетей передачи данных стандарта IEEE 802.11n» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.linkc.ru/article.php?id=223>
7. «Группа стандартов WiFi IEEE 802.11» [Электронный ресурс]. URL: <http://wi-life.ru/texnologii/wi-fi/wi-fi-standarty>
8. «Wi-Fi и технология IEEE 802.11» [Электронный ресурс] . URL: http://www.bookasutp.ru/Chapter2_11_4.aspx
9. «Стандарт 802.11n — путь к новому поколению WLAN» [Электронный ресурс]. URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=10804>. Увеличение эффективности передачи
10. «Эволюция скорости передачи данных в сетях Wi-Fi» [Электронный ресурс]. URL: <https://habrahabr.ru/post/254559/>
11. «Мультисервисные сети» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.intech-nsk.ru/solutions/5/>
12. «Концепция построения мультисервисной сети связи» [Электронный ресурс]. URL: http://www.datatelecom.ru/option=com_content&view=article&id=5
13. Гургенидзе А. Т., Кореш В. И. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа. Санкт-Петербург, Наука и техника, 2003. 400 с.

14. Величко В. В., Субботин Е. А., Шувалов В. П., Ярославцев А. Ф. «Телекоммуникационные системы и сети. Том 3. Мультисервисные сети». Москва: Горячая линия-Телеком, 2005. 592 с.
15. Степанов С. Н. «Основы телетрафика мультисервисных сетей». Москва, Экотрендз, 2010. 394 с.
16. Ю.Гуревич, В.Петрищев. Некоторые особенности построения беспроводных сетей [Электронный ресурс]: «Экспресс-Электроника» №12/2003. URL: <http://citforum.ck.ua/hardware/mobile/wlan/>
17. Осипчук С.А. Дисертація на тему: «Повышение информационной эффективности беспроводных систем передачи на основе перераспределения ресурсов канала связи», 2015, с.196.
18. Уривський Л.А., Т.М.Наритник, Осипчук С.О. Особливості формування сигнально-кодкових конструкцій на основі технології Wi-Fi для побудови телекомунікаційних систем терагерцового діапазону / Електронне наукове фахове видання – журнал «Проблеми телекомунікацій». – 2015. - №2(17). – С.37-53.
19. Смелянский Р.Л. Компьютерные сети: в 2 т. Т.І. Системы передачи данных/ Р.Л. Смелянский. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. - 304 с.
20. Кравчук С.О., Наритник Т.М. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону. Монографія. – Житомир : ФОП «Євєнюк О.О.», 2015
21. Уривський Л. А., Осипчук С.А. Синтез сигнально-коддовых конструкций для OFDM сигналов в канале с постоянными параметрами // Научно-виробничий збірник «Наукові записки УНДІЗ». – 2014. – № 4 (32). – С. 41-48.
22. Патент на корисну модель №UA 95365 U (Україна). Спосіб адаптивного вибору виду багатопозиційної модуляції / Уривський Л.О., Осипчук С.О., Прокопенко К.А. Публікація відомостей про видачу патенту: 25.12.2014, Бюл.№ 24.
23. Уривський Л.О., Мошинська А.В., Прокопенко К.А. Модифікована методика оцінки ефективності систем передавання інформації на основі показників Зюко А.Г. – К. : Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2010. – № 6(74). – С. 24-29.

24. Горбатий І.В. Дослідження технічної ефективності радіоканалів телекомунікаційних мереж // Електронне наукове фахове видання - журнал «Проблеми телекомунікацій», 2016.
25. Степанов С.Н., Костров А.В. Моделирование мультисервисной сети с обобщенной схемой резервирования канального ресурса, Т-COMM, 2008 г. - 12 с.
26. Лагутин В.С., Степанов С.Н. Телетрафик мультисервисных сетей связи. - М.: Радио и связь, 2000. - 320 с.
27. Пшеничников А.П., Васькин Ю.А., Степанов М.С. Распределение канального ресурса, Т-COMM, 2009 г. - 46 с.
28. Кокина О. А., Степанов С.Н. Построение модели и алгоритмов оценки характеристик пропускной способности звена мультисервисной сети связи с учетом повторных вызовов//Автоматика и телемеханика. — 2006. — № 6.
29. ITU-T Recommendation Y.2001, General overview of NGN, 2004. (Next Generation Networks – Frameworks and functional architecture models).
30. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет, Наука и Техника, 2004 - 336 с.
31. Смирнов П.И. Способы оценки показателей качества обслуживания в мультисервисах, Наука и Техника, 2012 - 25 с.
32. Антонников Д.О., Смирнов Н.И. Перспективы развития технологии Wi-Fi с учетом новых стандартов передачи данных, Технологии информационного общества, 2009 г.
33. Шиндер ДЛ Основы компьютерных сетей. — М.: Cisco Press, Вильямс, 2007. — 656 с.
34. Пакет К, Тир Д Создание масштабируемых сетей Cisco. — М.: Cisco Press, Вильямс, 2007. — 792 с.
35. Рошан П., Лиэри Д, Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. — М.: Cisco Press, Вильямс, 2004. — 296 с.